

Rapport de projet ATI

Saloua Abouelaz - Adria Canos - Hugo Boyaval - Theo Pourcelot

Influence des particules fines sur la prise des liants hydrauliques dans les sols argileux



EEIGM

ÉCOLE EUROPÉENNE D'INGÉNIEURS
EN GÉNIE DES MATÉRIAUX

Tuteur Industriel : M. Voirin

Tuteurs scientifiques : Mme Simonnot et M. Laubie

Remerciements

Ce dossier scientifique et technique a pu être réalisé grâce à la société XX sans laquelle ce projet n'aurait pas pu exister.

Merci à notre tuteur industriel M. J.VOIRIN pour nous avoir guidés tout au long notre travail.

Tous nos remerciements vont à nos deux tuteurs au sein de l'Ecole Européenne d'Ingénieurs en Génie des Matériaux (EEIGM), Mme M-O.SIMONNOT et M. B.LAUBIE pour nous avoir accompagnés et conseillés tout au long de l'année universitaire. Nous tenons également à exprimer nos remerciements à M. A. RICHY pour nous avoir donné accès à la salle de TP pour faire nos manipulations.

Merci à tous,

Saloua ABOUELAZ, Adria CANOS, Hugo BOYAVAL, Théo POURCELOT

Table des matières

Rapport de projet ATI	1
Résumé	6
Abstract	6
Resumen	7
INTRODUCTION	8
A) ÉTAT DE L'ART	8
B) GENERALITES SUR LA STRUCTURE DES ROUTES ET LA CLASSIFICATION DU SOL.....	9
I) Structure d'une route	9
II) Classification du sol	10
C) DEFINITION ET PROPRIETES DES PARTICULES FINES :	12
I) Introduction et clarifications de nomenclature	12
II) Structure des argiles et phénomènes d'échange ionique.....	13
i. Introduction.....	13
ii. Les minéraux de type 1/1 (T-O).....	13
iii. Les minéraux de type 2/1 (T-O-T).....	14
III) Les grandes familles d'argiles minéralogiques étudiées	15
i. Les smectites	15
ii. Les kaolinites	17
IV) Comportement des argiles dans un milieu basique riche en calcium.....	18
V) Les mécanismes d'adsorption sur les sites de réaction	18
i. Cas des surfaces latérales.....	19
ii. Cas des surfaces basales.....	19
iii. Modèle théorique pour l'adsorption dans les argiles	21
VI) Cas particulier de l'adsorption des ions calcium Ca^{2+} +	22
D) LE TRAITEMENT AUX LIANTS HYDRAULIQUES.....	23
I) Mise en place du traitement	23
II) Définition d'un liant hydraulique	24
III) Liants hydrauliques routiers ou LHR.....	25
i. Les avantages	25
ii. Domaines d'emploi et limite d'utilisation	25
iii. Les constituants.....	26
IV) Les réactions d'hydratation.....	27
V) Les réactions pouzzolaniques.....	29
VI) Cinétique de la prise d'un liant hydraulique	30
i. Motivation de cette partie	30
ii. Période initiale (initial period) et période de réaction lente (slow reaction period)	31
iii. Période d'accélération (acceleration period).....	31
iv. Morphologie et mécanisme de croisement de CSH	31
v. Période de ralentissement	31
VII) Modèle microstructural de solidification	32
E) Perturbations sur la prise liées aux échanges cationiques :	33
I) Phénomènes d'échange ionique dans le traitement aux liants hydrauliques :	33
i. La floculation/agglomération des plaquettes argileuses	33
ii. L'adsorption des ions calcium Ca^{2+} +	35
iii. La formation d'hydrates calciques par dissolution des plaquettes	36
iv. Conclusions liées aux échanges cationiques.....	36
F) EXPERIENCES SUR MELANGES SABLE-ARGILE-LIANT-EAU	37

I) Définition de l'expérience :	37
II) Cas d'étude : l'Alsace	37
III) Matériel utilisé	39
i. Melanges	39
ii. Instrumentation	39
IV) Plan d'expérience envisagé	39
V) Méthode suivi pour la fabrication des éprouvettes	41
VI) Détermination de la teneur en eau de chaque éprouvette	42
VII) Exploitation des résultats	43
i. Analyse granulométrique des argiles :	43
ii. Essai en compression :	45
VIII) Conclusion et poursuite d'étude	45
BIBLIOGRAPHIE	47
ANNEXES :	1
I) Tableau récapitulatif des liants disponible dans le grand Est.	1
II) Liste des engins utilisés lors de l'élaboration d'une couche de forme	5
III) Résultats des expériences	7
i. Test en compression à 14 j.	7
ii. Tests en compression à 21 j.	10
iii. Tests en compression à 28j.	14

Résumé

La grande surface spécifique des particules fines, ainsi que leur grande réactivité dérivent directement de leur morphologie et structure cristallographique et varient selon les conditions du sol.

Le but de ce projet est donc de connaître l'influence de ces particules sur la formation et la stabilité des espèces liantes issues de l'hydratation d'un liant hydraulique routier. Pour cela, les effets des échanges cationiques des particules fines avec le milieu réactionnel ont été étudiés, l'objectif étant la détermination des mécanismes par lesquels les différents processus se produisent : la compréhension de l'ensemble des réactions de la prise d'un liant hydraulique et la connaissance de la composition et la morphologie des espèces liantes produites permet de comprendre les différentes interactions qui peuvent avoir lieu.

Ayant découvert la grande variété en composition des particules fines existantes, les composantes étudiées ont été réduites à l'ensemble des particules argileuses de petite taille, étant donnée leur forte capacité d'échange de cations. D'après la recherche bibliographique :

- 1) le gonflement est le mécanisme de réduction de résistance le plus important à court terme (premiers jours de la réaction de prise) dans le cas des argiles de type smectite, néanmoins il s'agit d'un phénomène déjà connu, donc il ne sera pas traité de façon détaillée.
- 2) L'adsorption des ions Ca^{2+} influe sur la cinétique des réactions de prise du ciment, soit les favorise, soit les empêche de former des espèces liantes, en fonction de la cinétique de la réaction de prise.
- 3) Les conditions de la solution : pH, température, force ionique, teneur en eau... peuvent minimiser ou maximiser les perturbations.

Des expérimentations ont été effectuées avec des mélanges modèles mélanges eau-liant-sable-argiles, qui ont été caractérisés et soumis à des tests de résistance à la compression. Les mélanges avec le plus fort taux de smectite ont montré une résistance moindre. Ces résultats seraient à confirmer par l'étude plus approfondie de l'influence des différents paramètres.

Abstract

The high surface area of fine particles in soil and their high reactivity derive directly from their morphology and crystallographic structure, and vary according to soil conditions

The aim of this project is to understand the influence of these particles on the formation and stability of the binding species from the hydration of a road hydraulic binder in a soil treatment process. To reach this goal, the effects of cation exchange between fine particles and the environment were studied with the aim of finding the mechanisms governing the various involved processes: the understanding of all the reactions taking place in a hydraulic binder and knowledge of the composition and morphology of the binding species produced are keys to understanding the different interactions likely to occur.

Given the wide composition variety of fine particles, studies were focused to clay particles due to their high ion exchange capacity. Different conclusions could be drawn from the bibliographic work:

- 1) Swelling is the most important strength reduction mechanism in short term reaction periods (first days of the setting reaction) in the case of smectite clays. However, many studies have been performed that describe this phenomenon, so this project will not address it in a too much detailed way.

- 2) The adsorption of Ca^{2+} ions influences the kinetics of the cement setting reactions, either accelerating it, either slowing it down, depending on the reaction period of the setting reaction.
- 3) Soil solution conditions such as pH, temperature, ionic strength or humidity can minimize or maximize the influence of fine particles.

A final experiment was performed for various mixtures of water-sand-clay-binder to determine the clay presenting the most problems for compressive strength development.

Experiments were performed with model mixtures of water-sand-clay-binder, which were characterized and submitted to compressive strength development. The mixtures containing the highest smectite proportions exhibited a lower resistance. These results should be confirmed by a more extensive study of the influence of the different parameters.

Resumen

La elevada superficie específica de las partículas finas en el suelo y su alta reactividad derivan directamente de su morfología y estructura cristalográfica, y según las condiciones del suelo.

El objetivo de este proyecto es entender el impacto de estas partículas en la formación y estabilidad de las especies aglomerantes producidas durante la hidratación de un aglutinante hidráulico en un proceso de tratamiento del suelo. Para ello, el efecto de los intercambios iónicos entre las partículas finas y el medio de reacción han sido estudiadas con el objetivo de encontrar los mecanismos que gobiernan los procesos que tienen lugar. La comprensión de las reacciones que se dan en el sistema estudiado y el conocimiento de la morfología y la composición de las fases formadas durante la hidratación del aglutinante son clave para entender las diferentes interacciones que pueden producirse.

Después de descubrir la gran variedad de composición existente en las partículas finas, los estudios fueron reducidos a partículas de arcilla debido a su alta capacidad de intercambio de iones. Diferentes conclusiones pueden extraerse de la bibliografía consultada:

- 1) La expansión es el mecanismo más importante de disminución de resistencia en los períodos de reacción a corto plazo (primeros días de la reacción de fraguado) en el caso de las arcillas de esmectita. Sin embargo ya existen muchos estudios que describen este fenómeno, por lo que no se abordará de una manera detallada
- 2) La adsorción de los iones Ca^{2+} influye en la cinética de la configuración de las reacciones de cemento, ya sea acelerándola, ya sea ralentizándola, dependiendo de la etapa cinética en la que se encuentre la reacción de fraguado.
- 3) Diferentes condiciones del suelo como el pH de la solución, la temperatura, la fuerza iónica o la humedad pueden minimizar o maximizar el impacto de las partículas finas.

Un experimento ha sido realizado para diversas mezclas de arena-arcilla-aglutinante-agua para poder determinar cuál es la arcilla que presenta más problemas para el desarrollo de resistencia a la compresión.

INTRODUCTION

Cette étude répond à une problématique proposée dans le cadre d'un projet industriel des élèves de troisième année EEIGM par M. Voirin, directeur du laboratoire d'études et de formulation de l'entreprise XX, à Messein.

XX est une société en activité depuis 1984, installée à Nancy, spécialisée dans le secteur d'activité de la construction de routes et autoroutes. XX produit annuellement 9,7 Mt de granulats, 3,7 Mt d'enrobés et 100900 tonnes de liants. Son chiffre d'affaires de l'année 2014 a été de 524 312 200 € [1]

XX possède un laboratoire d'études et de formulations à Messein, à 11 km de Nancy. Ce laboratoire se consacre principalement au développement de liants hydrocarbonés, d'ECF, d'enrobés bitumineux à chaud et à froid, de matériaux traités aux liants hydrauliques et de traitements de sols et granulats [2].

Afin d'obtenir les propriétés mécaniques du sol requises à l'accueil d'un trafic routier, la construction d'une route nécessite l'utilisation des liants (chaux et ciments). Cette application du liant ne peut pas s'appliquer sur le sol directement, en effet beaucoup de facteurs peuvent perturber la bonne prise de ces liants.

Toutefois, certains sols ne montrent pas une amélioration des propriétés lors de ce type de traitement. La teneur en particules fines (particules de diamètre inférieur à 2 μm) est supposée jouer un rôle important sur les propriétés du sol. Cette étude considère comme « sol problématique » un sol loess typique de la région d'Alsace, qui ne présente pas de bonne réponse aux traitements.

L'objectif du projet est de déterminer l'influence de la teneur en particules fines sur la formation des espèces qui vont donner la résistance au sol lors de la prise des liants ajoutés, la recherche bibliographique est organisée en 5 parties. La première présente l'état de l'art du traitement aux liants, la deuxième traite des aspects fondamentaux sur la caractérisation du sol et les revêtements routiers, et ensuite la troisième aborde le concept et les propriétés physico-chimiques des particules fines, essayant aussi de justifier le choix des espèces de minéraux finalement étudiés. La quatrième partie propose une description du protocole du traitement aux liants hydrauliques, et comprend aussi tous les aspects liés aux réactions qui ont lieu. L'ensemble des concepts maîtrisés dans les trois parties précédentes permettent dans la cinquième partie d'expliquer les origines des facteurs perturbateurs sur le traitement qui sont liés aux propriétés caractéristiques des fines.

Finalement, une sixième partie est dédiée à la description et l'analyse des résultats des essais à la compression sur différents mélanges de particules fines et sable, en vue d'utiliser des paramètres macroscopiques pour déterminer l'effet des particules micrométriques sur l'ensemble de la pâte.

A) ÉTAT DE L'ART

Les besoins d'infrastructures pour le transport ont conduit au développement des routes, autoroutes et autres voies routières qui demandent l'utilisation d'une logistique ainsi que d'une technique poussée.

La construction d'une route nécessite donc un travail important du sol ; dans plusieurs cas le sol seul ne possède pas les qualités requises à l'accueil d'un trafic routier. Ces travaux sont des œuvres de terrassement qui concernent la réalisation d'assises, couches de forme et remblais (voir la partie de généralités sur la structure des routes et classification du sol).

Les quarante dernières années en France ont vu l'apparition d'une nouvelle approche pour ces travaux, qui consiste en différents traitements en place sur les sols avec des liants hydrauliques (liant hydraulique routier, ciment, chaux). En 2000, le volume de sols fins déplacés pour des terrassements en France était estimé à 90 millions de m³ [3] et seulement 30% à 50% de ceux-ci étaient améliorés avec des liants [3]. Par conséquent, cette nouvelle approche n'est pas encore considérée complètement faisable.

La prise des liants devrait permettre d'arriver aux réquisits mécaniques demandés pour le sol. Ce type de traitements s'est développé surtout pour deux raisons :

- une raison économique (par exemple, une plate-forme commerciale ou industrielle construite en Ile-de-France avec des matériaux granulaires, coûte 40% plus cher qu'une plate-forme en sols traités) [4]
- la deuxième raison concerne la pollution produite lors de l'extraction des granulaires des carrières. Effectivement le traitement en place minimise les impacts sur l'environnement par rapport à d'autres approches, car idéalement aucun granulaire ne devrait être extrait et transporté vers les travaux, il suffirait avec les matériaux déjà présents dans le sol et les liants. [4]

Cependant, le syndicat professionnel des terrassiers de France (SPTF) a montré que plusieurs chantiers autoroutiers avaient chaque année des problèmes en raison du manque de l'amélioration des propriétés de certains sols pour ce traitement, ce qui influe énormément sur le coût des travaux, parce qu'il est alors nécessaire de transporter des nouveaux granulaires [4]

Les causes de ce manque d'efficacité n'ont pas encore été déterminées de façon précise. Cette étude suit donc des travaux effectués par [4], [3], [5] en se concentrant sur le possible influence des particules de granulométrie fine sur le développement de la résistance du sol.

B) GENERALITES SUR LA STRUCTURE DES ROUTES ET LA CLASSIFICATION DU SOL

I) Structure d'une route

Le sous-sol d'une route est constitué de plusieurs couches caractéristiques comme le propose le Guide technique des Terrassements Routiers (GTR) avec une coupe comme celle présentée sur la figure 1 [6].

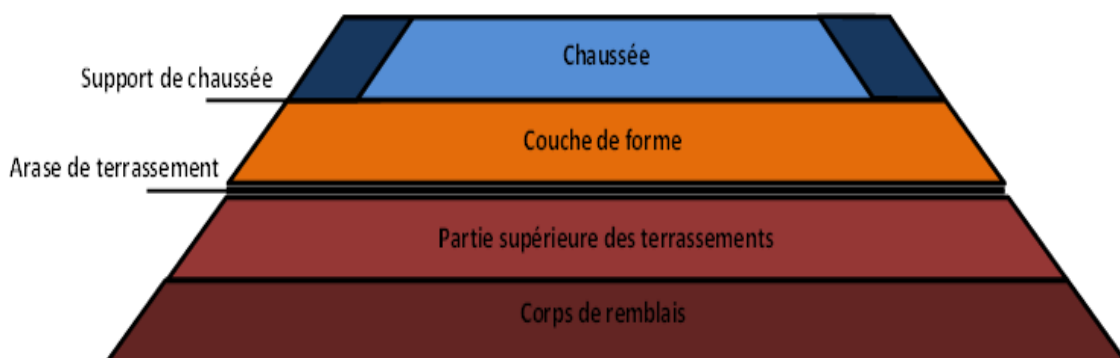


Figure 1 Profil des couches présentes dans une route (d'après (6))

Le profil est constitué de quatre grandes couches : la chaussée, la couche de forme, la partie supérieure des terrassements et le corps de remblais, avec la chaussée qui contient les couches de roulement, de base et de fondation.

La couche la plus importante, et donc celle qui va faire l'objet de toutes les études, est la couche de forme car c'est elle qui va déterminer la bonne tenue de la chaussée en maintenant en place tous les matériaux qui la composent. Elle doit donc répondre à toutes les exigences mécaniques, géométriques, hydrauliques et thermiques nécessaires à la viabilité d'une route. Selon la nature du sol, du climat ou du type de trafic que va accueillir la route la couche de forme peut prendre plusieurs formes à savoir :

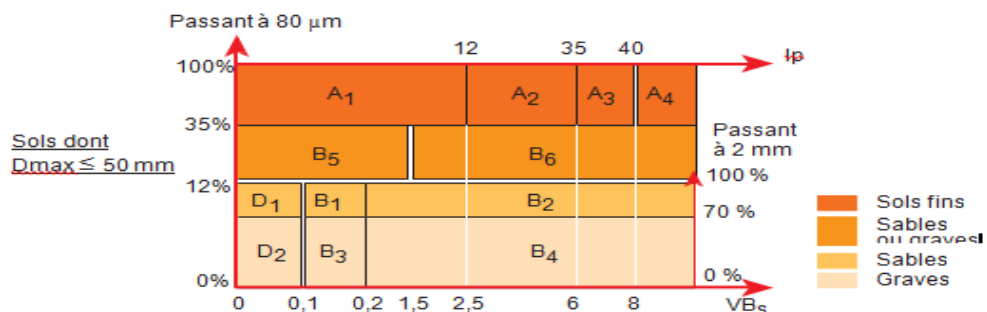
- être absente dans le rare cas où le sol possède déjà toutes les caractéristiques requises
- être composée d'un remblai (apport de matériaux extérieurs) les caractéristiques duquel sont idéales
- être formée de plusieurs couches de matériaux avec des propriétés différentes pour permettre à la couche de forme d'être plus polyvalente.

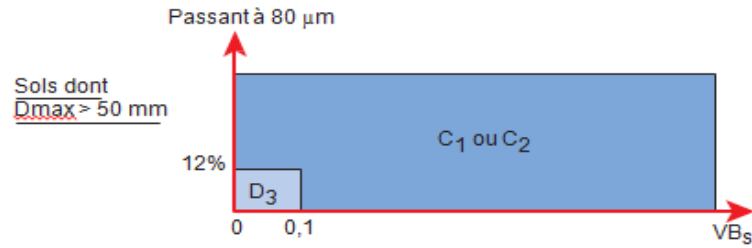
La couche de forme est essentielle car elle va devoir servir de route lors du chantier pour acheminer les matériaux et matériels nécessaires. Elle doit donc tout d'abord réaliser un nivellement de la plateforme et posséder une portance suffisante (c'est-à-dire être assez résistante) pour ne pas se désunir lors d'aléas météorologiques et de bien résister pour pouvoir compacter les couches de la chaussée. Elle est aussi importante pour la viabilité à long terme de la route car elle va homogénéiser la portance le long du tracé pour éviter d'avoir des fluctuations dans l'épaisseur de la chaussée. De plus, la couche de forme doit pouvoir résister aux variations des conditions climatiques notamment avec l'eau qui pourrait changer les propriétés mécaniques ou bien de la température.

D'après les fonctions auxquelles doit répondre la couche de forme, le(s) matériau(x) qui la composera/composeront doit/doivent répondre à ces dernières selon le degré de liberté qui est accordé à chaque propriété. Il faut alors prendre en compte la sensibilité à l'eau, la dimension des éléments, la résistance ou encore la sensibilité au gel. Il est, par conséquent, important de pouvoir recenser l'ensemble des matériaux disponibles pour pouvoir adapter les caractéristiques de la couche de forme de façon à pouvoir maîtriser au mieux les travaux.

II) Classification du sol

Toujours d'après le GTR [6], les différents matériaux présents dans la couche de forme sont regroupés en fonction de leur taille et leur nature (roche, sol ou produit industriel). Selon la précision du nivellement recherché, les matériaux sont sélectionnés en lisant simplement les figures 2 en fonction de la proportion de particules passant des tamis de différentes tailles normées.





Matériaux rocheux	Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Craies	R ₁
			Calcaires	R ₂
		Roches argileuses	Marnes, argilites, pélites...	R ₃
		Roches siliceuses	Grès, poudingues, brèches...	R ₄
		Roches salines	Sel gemme, gypse	R ₅
	Roches magmatiques et métamorphiques	Granites, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardoisiers...		R ₆
Matériaux particuliers	Sols organiques et sous-produits industriels			F

Figure 2 Classification des sols [6]

II) Structure des argiles et phénomènes d'échange ionique

i. Introduction

Les minéraux argileux possèdent des propriétés bien particulières qui sont dues à leurs petites tailles, la structure cristalline et la charge des feuillets de qui sont constituées [9].

Leurs caractéristiques les plus remarquables sont dérivées directement des échanges d'espèces ioniques des plaquettes argileuses avec la solution ; ces propriétés ont une influence directe sur les propriétés mécaniques [3] :

- Gonflement : ce phénomène est dû à la charge permanente de certaines argiles conséquence de la substitution de cations dans les couches tétraédriques ou octaédriques. Pour compenser la charge, des ions diffusent vers les espaces interfoliaires des plaquettes de ces argiles [3] (voir le cas de l'illite après). L'espacement interfeuillets varie donc en fonction du rayon des ions qui y se trouvent, en faisant varier ainsi le volume du matériau, ce qui selon les conditions peut provoquer la formation de fissures.
- Coagulation/floculation : les charges négatives en surface des particules d'argiles sont responsables de l'établissement d'un champ électrostatique autour d'elles. Ce champ permet le développement de la double couche d'eau entourant les argiles (eau libre et eau liée, voir la partie sur le modèle théorique pour l'adsorption des argiles). L'ajout de chaux modifie la charge superficielle des argiles et donc la structure de la double couche dont l'extension diminue (voir le cas particulier de l'adsorption de l'ion Ca^{2+}). Elles forment avec l'eau des solutions colloïdales qui flocculent lorsque les charges de surface des particules sont neutralisées par des ions. [3]
- La formation d'espèces liantes à pH élevés, qui sera discutée plus en détail dans la partie dédiée aux perturbations de la prise.

Les argiles ont donc la capacité de pouvoir échanger une partie des cations retenus dans l'espace interfoliaire ou d'en absorber en surface. La capacité d'échange est appelée CEC (Capacité d'Echange Cationique), elle est mesurée le plus souvent en meq/g. Elle concerne en particulier les cations suivants, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ . Elle dépend aussi de la nature des argiles présentes dans le sol ainsi que du pH. Les trois phénomènes commentés ci-dessous sont tous considérés dans la CEC globale du matériau.

Selon l'empilement des couches à l'intérieur du feuillet, deux classes de minéraux sont distinguées : les minéraux de type 1/1 (T-O), et les 2/1 (T-O-T).

ii. Les minéraux de type 1/1 (T-O)

Ils sont constitués de feuillets comprenant une couche de tétraèdres d'oxygènes O^{2-} , dont les sites au milieu sont occupés par du silicium, accolée à une couche octaédrique dont les sites au milieu de chaque octaèdre sont occupés par de l'aluminium. Les tétraèdres et les octaèdres se développent selon les axes a et b cristallographiques, l'empilement des feuillets se fait selon l'axe c. La distance basale est de l'ordre de 7 Å. Dans la couche tétraédrique, chaque tétraèdre SiO_4^{4-} est lié par trois de ses sommets aux tétraèdres voisins. Le quatrième sommet assure le lien avec le cation de la couche octaédrique (Figure 4).

L'ensemble des charges est réparti de telle sorte que le feuillet élémentaire est électriquement neutre. L'espace interfoliaire ne comprend donc pas de cations. Les particules constituant les minéraux de type 1/1 ont leurs feuillets successifs empilés de telle sorte que le plan d'oxygène d'un feuillet se trouve en face de groupements hydroxyles du feuillet voisin, ne présentant donc pas de gonflement. [10]

La conséquence d'une telle disposition est la stabilisation du réseau par liaisons hydrogènes inter-feuillets. Les particules se présentent comme des plaquettes rigides dont l'extension latérale est de l'ordre de quelques centaines de nm et l'épaisseur de quelques dizaines de nm.

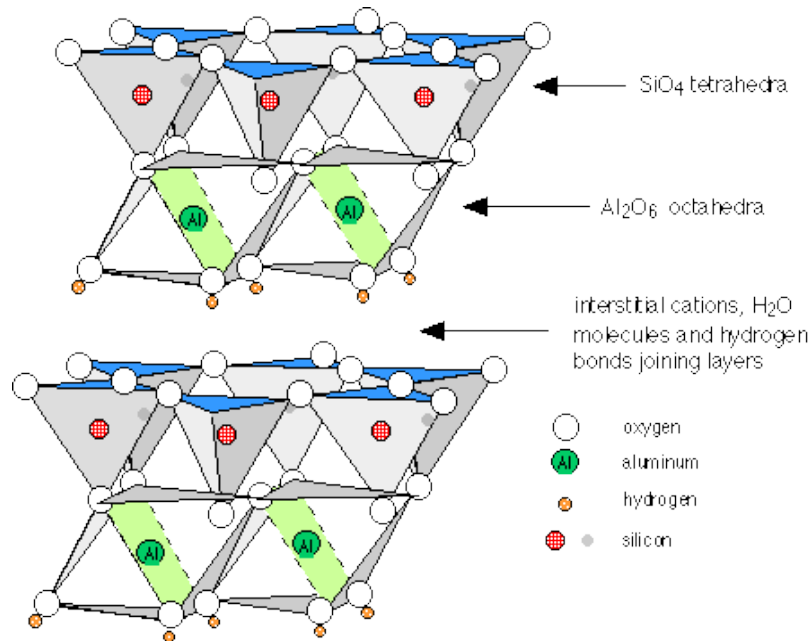


Figure 4: Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres alumineux (cas de la $Si_4Al_4O_{10}(OH)_8$, kaolinite)

iii. Les minéraux de type 2/1 (T-O-T)

Les feuillets des minéraux de type 2/1 sont constitués de deux couches tétraédriques contenant du silicium encadrant une couche octaédrique contenant de l'aluminium. [8]

La distance basale est de l'ordre de 9 Å. Souvent, dans les minéraux de type 2/1, des substitutions cationiques sont observées. Dans les tétraèdres, elles correspondent au remplacement de Si^{4+} par Al^{3+} et/ou Fe^{3+} . Dans les octaèdres, Al^{3+} est remplacé par Fe^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} et Fe^{2+} ou Mg^{2+} par Li^+ . Cette substitution entraîne un déficit de charge positive au niveau du feuillet, compensé par des cations dans l'espace interfoliaire, généralement des ions potassium ou sodium, qui peuvent être substitués par d'autres cations en solution. La substitution des cations interfoliaires se produit plus facilement que ses dimensions sont plus petites et la charge des cations est plus faible [4]:

$$Na^+ < H^+ < K^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+}$$

En l'absence de substitutions cationiques, le déficit de charge est nul et il n'y a pas de cations dans l'espace interfoliaire

Les cations avec leur sphère d'hydratation pénètrent dans l'espace interfoliaire et induisent un gonflement de la particule. Dans ce cas, la distance basale est fonction de la charge et du nombre de

molécules d'eau associées à ces cations. En effet, les molécules d'eau réduisent l'attraction cation feuillet. [8]. Plus il y a de molécules d'eau, plus la distance basale augmente. C'est le cas des smectites où chaque feuillet a une extension latérale très grande de 0,1 à 1 μm . Dans le cas de l'illite le déficit de charge provient essentiellement de substitutions dans les couches tétraédriques. Ces ions s'insèrent entre les feuillets et contribuent à rigidifier l'ensemble. La capacité de gonflement de l'illite par insertion d'eau entre les feuillets est inexistante du fait de la faible distance interfoliaire [8]

Le cas des smectites, comme la montmorillonite, est un peu différent de celui de l'illite. En effet, pour les smectites, le déficit de charge varie entre 0,6 et 0,9 du fait des substitutions à la fois dans les couches tétraédriques et/ou octaédriques. La compensation électrique est assurée par l'insertion de cations plus ou moins hydratés dans l'espace interfoliaire. L'une des conséquences est que ce type d'argile peut accueillir des molécules d'eau dans l'espace interfoliaire et constituer une argile gonflante. [8]

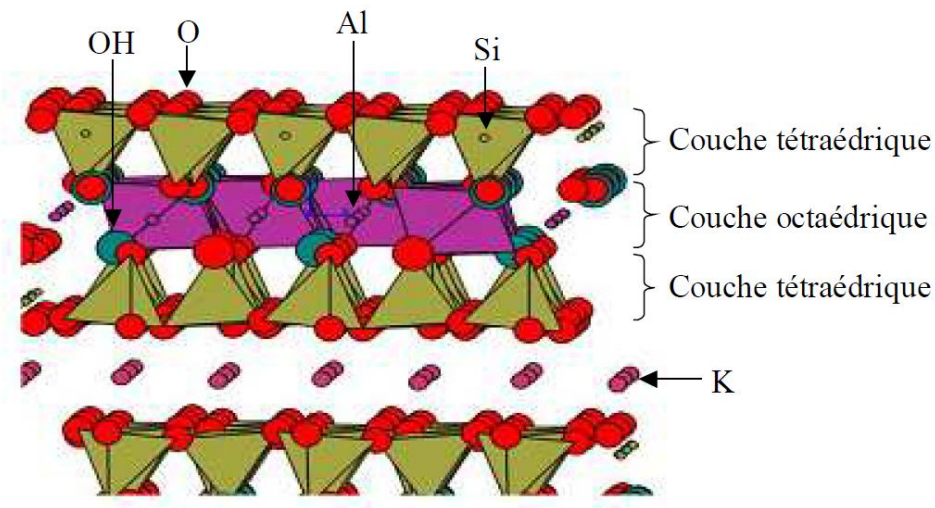


Figure 5: Représentation schématique des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdre alumineux (cas de l'illite).

III) Les grandes familles d'argiles minéralogiques étudiées

Les minéraux les plus fréquemment rencontrés dans les sols sont: les kaolinites, les illites, les smectites, les montmorillonites, les chlorites et les vermiculites. Dans l'expérience réalisée (partie VI), les trois premières ont été utilisées. Leurs propriétés doivent donc être traitées plus en profondeur dans le but de mieux comprendre le système de mise en place et d'analyser les résultats de l'expérience. La smectite et l'illite étant deux argiles TOT, il suffit dans une première approche de comprendre les propriétés de la smectite pour comprendre celles de l'illite, qui ne diffèrent que par un nombre plus faible de substitutions isomorphes dans les plaquettes.

i. Les smectites

Les smectites correspondent à un groupe d'argiles qui inclut la montmorillonite, la nontronite, la beidelite...

Le feuillet est composé de deux couches tétraédriques enserrant une couche octaédrique. Les tétraèdres pointent vers la couche octaédrique avec laquelle ils partagent un anion O^{2-} [11].

La montmorillonite est la smectite la plus abondante, elle possède des substitutions dans les deux types de couches mais celles localisées dans la couche octaédrique sont généralement plus nombreuses; Mg^{2+} est le cation dominant en remplaçant le cation Al^{3+} [11].

Formule théorique : $Si_8Al_4O_{20}(OH)_4 \cdot n H_2O$ (smectite)

Pour chaque type d'argile il est important de connaître la distribution des feuillets pour pouvoir expliquer son comportement physico-chimique dans le milieu réactionnel. Pour cela, il est fondamental de s'intéresser à l'épaisseur des feuillets e et à la distance interfoliaire δ .

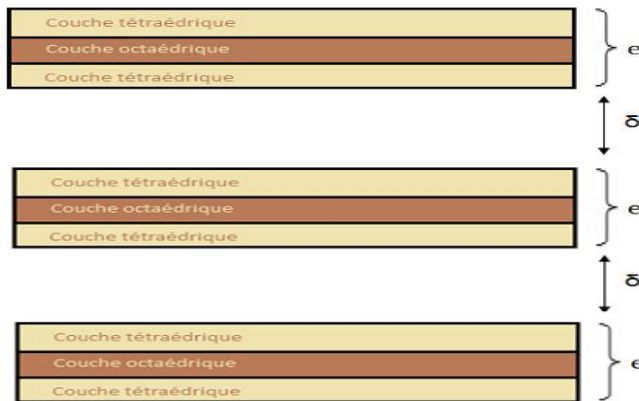


Figure 6: Représentation schématique de l'empilement des feuillets. Le dessin représente trois feuillets, avec trois couches chacun, qui figure ainsi une particule de montmorillonite. La distance de séparation des feuillets est δ et l'épaisseur est e .

$$\delta = 0.7271 \pm 0.0019 \text{ nm}$$

Tableau 1: Distribution des charges dans le motif de répétition sans considérer substitutions

$6O^{2-}$	12-
$4 Si^{4+}$	16+
$4 O^{2-}$ et $2 (OH)^{-}$	10-
$4 Al^{3+}$	12+
$4 O^{2-}$ et $(OH)^{-}$	10-
$4 Si^{4+}$	16+
$6 O^{2-}$	12-

D'après cette distribution l'ensemble du matériau est neutre, si et seulement si le matériau est considéré un milieu continu.

En raison de l'existence de substitutions, la structure réelle présente des défauts dans l'arrangement des ions dû à des dislocations du réseau et dans la distribution des charges [2]. L'espace interfoliaire δ varie selon la nature des cations compensateurs et la quantité de molécules d'eau retenues dans l'espace [8].

Les substitutions peuvent être présentes dans la couche tétraédrique et dans la couche octaédrique [11].

En général, une smectite présente donc une CEC très élevée de l'ordre de 0,95 meq/g [11]. En raison d'un nombre plus faible de substitutions dans l'illite, celle-ci a une CEC élevée, de l'ordre de 0,5 meq/g [11].

ii. La kaolinite

La structure du feuillet de la kaolinite est composée d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique qui partage des anions O^{2-} [11] (voir figure 4). Les feuillets possèdent 2 surfaces basales [11], la première est constituée par des tétraèdres d'ions O^{2-} contenant des cations de Si^{4+} et forment un réseau hexagonal plan avec des cavités situées au-dessus d'un groupe OH^- appartenant à la couche octaédrique. [8] Le tableau 2 montre le bilan de charges pour un motif T-O de la kaolinite ($Si_4Al_4O_{10}(OH)_8$) :

Tableau 2: Distribution des charges dans le feuillet

$6O^{2-}$	12-
$4Si^{4+}$	16+
$4O^{2-}$ et $2(OH)^-$	10-
$4Al^{3+}$	12+
$6(OH)^-$	6-

D'après cette distribution, l'ensemble du matériau est neutre, si et seulement si le matériau est considéré un milieu continu. Il faut retenir de ce groupe que sa CEC est normalement inférieure à 0,02 meq/g [11]

La figure 7 montre l'empilement des feuillets de la kaolinite. Il n'y a pas d'espace interfoliaire dans cette type d'argile, constitué d'une alternance de feuillets octaédriques et tétraédriques.

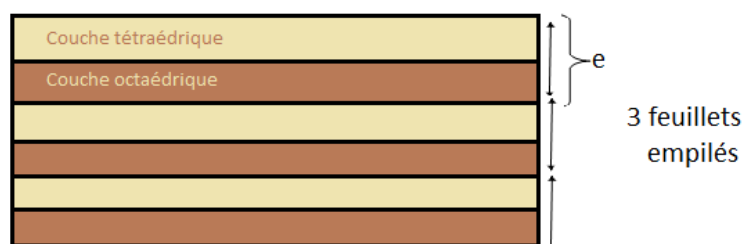
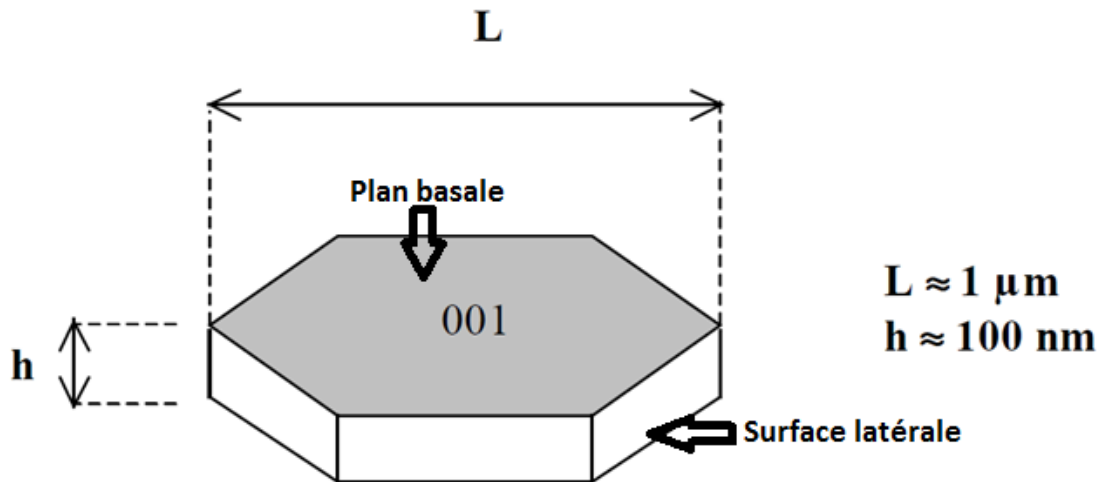


Figure 7 : Représentation schématique de l'empilement des feuillets. Le dessin représente trois feuillets empilés qui figure ainsi une particule de kaolinite

IV) Comportement des argiles dans un milieu basique riche en calcium

Afin de bien comprendre l'influence des particules fines sur la prise du ciment dans la couche de forme, il est indispensable d'assimiler les différents mécanismes d'adsorption des ions dans les argiles, et plus concrètement dans le cas du cation Ca^{2+} , car c'est celui qui est retrouvé le plus dans le milieu réactionnel. Les ions peuvent être adsorbés dans deux types de sites préférentiels (figure 8) :

- Dans les plans basaux :



- Sur les surfaces latérales

Figure 8 : Modélisation rudimentaire d'une plaquette d'argile [8] les plans basaux sont perpendiculaires à l'axe cristallographique $\{001\}$ les surfaces latérales sont parallèles à cet axe.

V) Les mécanismes d'adsorption sur les sites de réaction

Avant tout il est important de rappeler des notions fondamentales des réactions acide-base :

Une base de Brönsted est une entité moléculaire, ou l'espèce chimique correspondante, capable de fixer un proton en donnant une autre entité ou espèce chimique appelée l'acide conjugué. Les bases de ce type sont qualifiées de « fortes » ou « faibles » selon qu'ils sont complètement ou partiellement dissociés en solution.



Une base de Lewis est une entité moléculaire, ou l'espèce chimique correspondante, capable de fournir un doublet d'électrons. Une base de Lewis est donc capable de réagir avec un acide de Lewis pour former une espèce par mise en commun du doublet de la base.

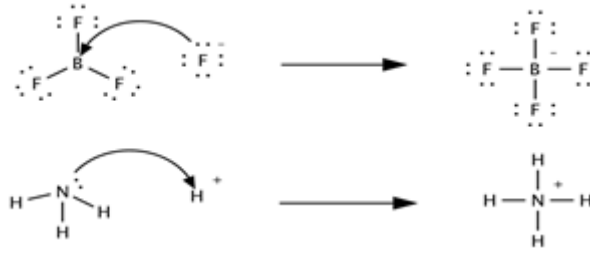


Figure 9 : réactions du fluor et l'ammoniac pour donner ses acides conjugués

Les réactions précédentes montrent respectivement la liaison formée par le fluor (base de Lewis) et le tri-fluorure de bore et la protonation de l'ammoniac grâce à ses doublets d'électrons non liants. Les deux produits formés sont donc les acides conjugués correspondants.

Les mécanismes d'adsorption dans les argiles ne peuvent pas se comprendre sans connaître les différences entre ses deux types d'espèces réactives.

i. Cas des surfaces latérales

Le nombre de liaisons des atomes au niveau de ces surfaces est différente de celles des atomes au sein des plaquettes. Le matériau a besoin donc de diminuer l'énergie d'interface dans ces sites, elles sont donc très réactives, étant normalement les premières qui adsorbent les ions présents en solution.

Selon que les atomes de la surface appartiennent à une couche tétraédrique ou octaédrique, les groupements fixés et les entités formées varient :

- Les atomes de silicium des couches tétraédriques fixeraient des ions OH^- pour donner des entités sylanols $Si - OH$ ionisables ayant un comportement d'acide de Brönsted
 - $Si - O^- / H^+$
- Les aluminium de bordure des couches octaédriques, de caractère plutôt amphotère, fixeraient des ions H^+ ou des ions hydroxyles pour donner des entités aluminols $Al - OH$, ou $Al - H$ donc soit de comportement basique, soit de comportement acide, les deux qui peuvent être expliqués dans le sens de Brönsted.

ii. Cas des surfaces basales

Si bien des expériences [8] montrent que les premiers sites qui réagissent dans les argiles sont celles localisées dans les surfaces latérales, il est aussi facile de montrer que la surface spécifique des surfaces basales est beaucoup plus élevée. Pour démontrer l'affirmation précédente, le modèle de la figure 8, élaboré à partir des données extraites de [4], a été utilisé pour calculer le rapport des surfaces disponibles pour l'adsorption dans une plaquette. L'hypothèse de milieu continu a été faite :

Soit h l'épaisseur de la plaquette selon l'axe $\{001\}$ et L la distance entre deux vertex de l'hexagone qui conforme une surface basale, le rapport de surfaces (latéral/basale) peut être calculé comme suit :

$$\frac{S_L}{S_B} = \frac{16h}{L(\sqrt{3} + 2)} \quad (2)$$

Où les six surfaces latérales de la plaquette ont été considérées et la surface basale est considérée comme un hexagone régulier. Avec les données de référence (figure 8), le rapport vaut:

$$\frac{S_L}{S_B} = 0,429 \quad (3)$$

D'où le pourcentage de surface basale peut être extrait:

$$\psi_B = \left(1 + \frac{S_L}{S_B}\right)^{-1} = 0,7 \quad (4)$$

D'autres auteurs [2] ont estimé un rapport de $\psi_B = 0,88$. L'approximation faite dans ce calcul n'est pas très réaliste mais sert à montrer l'énorme différence de surface spécifique qui existe entre les deux types de sites. Il est donc important de les étudier en détail car finalement ce sont elles qui adsorberait à long terme le plus d'ions. L'hypothèse selon laquelle la surface basale influence le plus à la prise des liants dans le sol a été faite.

Le mécanisme d'adsorption varie en fonction de la couche de la plaquette dans laquelle les ions seront adsorbés, donc en fonction du type d'empilement de l'argile considérée.

Pour illustrer les réactions qui ont lieu au sein des plans basales, le cas de l'adsorption de l'eau est présenté, pour tel de permettre de généraliser à la sphère d'hydratation d'un ion quelconque. Un modèle théorique qui décrit les interactions entre les ions adsorbés et les ions en solution est ensuite présenté pour finalement expliquer le cas particulier de l'ion calcium.

Les couches tétraédriques :

La figure 10 montre la structure de Lewis d'une couche tétraédrique. Les doublets non liants de l'oxygène permettent à l'argile de former des liaisons avec les protons de l'eau. De façon générale, les couches tétraédriques peuvent être vues comme des bases de Lewis qui adsorbent les ions grâce à ses interactions avec sa sphère d'hydratation, et libèrent parallèlement des anions dans certains cas (comme le cas de l'eau, dans lequel se produit la libération d'ions OH^- [2])

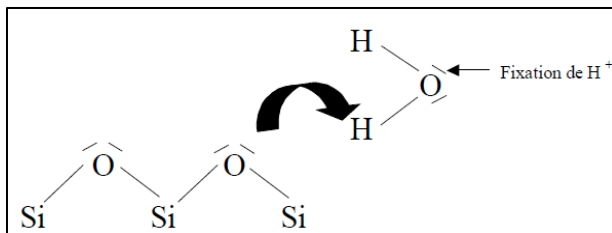


Figure 10 : Représentation schématique du mécanisme d'adsorption de la molécule d'eau dans la couche tétraédrique ; H^+ est fixé sur les oxygènes qui forment les tétraèdres.

Les couches octaédriques :

La figure 11 illustre le mécanisme d'adsorption pour une couche octaédrique. Similairement au premier cas, ce sont les interactions des orbitales électroniques de certains atomes de la couche et les ions en solution qui permettent de former les liaisons, concrètement les hydrogènes des hydroxyles, polarisés positivement, forment des liaisons avec les ions de la solution, et inversement aux couches tétraédriques, les couches octaédriques libèrent donc des protons, qui sont désassociés des molécules d'eau.

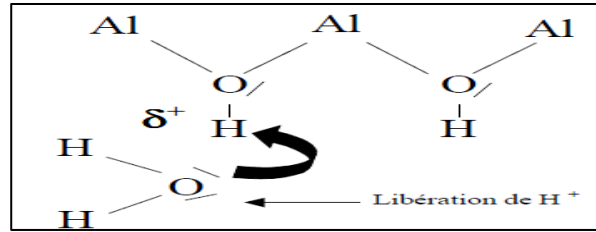


Figure 11 : Représentation schématisée du mécanisme d'adsorption de la molécule d'eau dans la couche octaédrique ; le H^+ des hydroxyles, polarisé positivement, permet fixer les anions.

Il est important de remarquer que, contrairement au cas des surfaces latérales, les surfaces basales ne sont pas chargées avant d'adsorber les ions, et la charge acquise dépend de la charge et le mécanisme de réaction de chaque espèce ionique.

iii. Modèle théorique pour l'adsorption dans les argiles

Le modèle de la triple couche électrique présenté à la suite permet de visualiser le profil de diffusion qui s'établit lors du chargement des surfaces des plaquettes d'argile (soit latérales ou basales). La théorie permettrait également de calculer l'énergie potentielle d'interaction entre les ions en solution et les particules chargées en surface [12].

Le modèle part de la supposition de la formation de deux couches dans la solution, en proximité de la surface ; une couche compacte qui contient des ions de charge opposée à la surface du solide, tandis que dans la couche diffuse il y a une certaine concentration de contre-ions, qui annulent progressivement la charge (et donc diminuent le potentiel électrique) en fonction de la distance à la surface. Le schéma est montré sur la figure 12 :

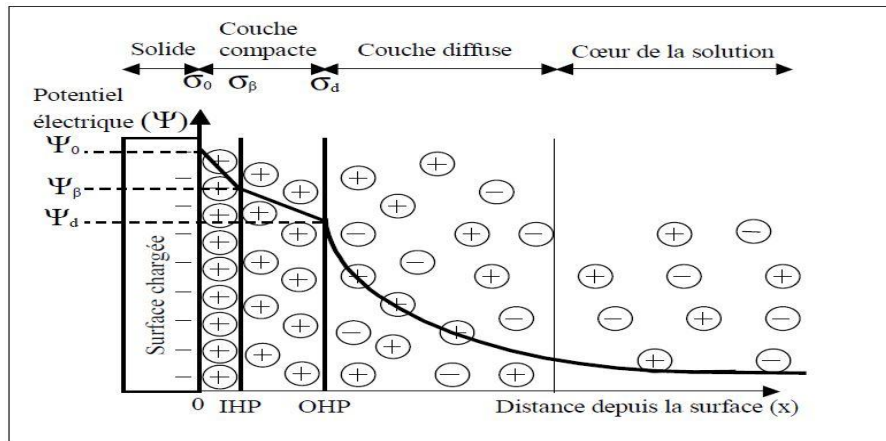


Figure 12 : Représentation du modèle de la triple couche électrique pour une surface chargée négativement. Ψ_i représente le potentiel électrique. IHP est le plan interne de Helmholtz et OHP est le plan externe de Helmholtz.

La couche compacte se sépare en deux couches en considérant l'encombrement des ions les plus proches du solide. Les plans interne (IHP) et externe de Helmholtz (OHP) délimitent respectivement, la couche compacte encombrée et la frontière entre la couche compacte et la couche diffuse. Ainsi finalement trois couches sont délimitées, et pour ça ce modèle s'appelle aussi le modèle de la triple couche électrique.

Dans le cas des surfaces latérales des argiles, chargées négativement à pH suffisamment élevés, les interactions entre cations minéraux et ces surface dépendent de trois facteurs :

- le rayon des actions non hydratés,
- la charge des cations,
- leur énergie d'hydratation (donc de leur sphère d'hydratation).

L'exemple du calcium sera ensuite traité et permettra mieux comprendre l'influence de ces paramètres.

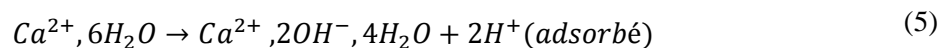
VI) Cas particulier de l'adsorption des ions calcium Ca^{2+}

Ce système particulier doit être traité, car la concentration d'ions calcium a une grande influence dans les réactions d'hydratation qui donnent lieu au développement des silicates de calcium hydratés, à la fois responsables du développement de la résistance du matériau (voir la partie sur les réactions d'hydratation du ciment).

Les cations de calcium en solution peuvent être adsorbés par les deux types de couches présentées précédemment ; la sphère d'hydratation qui entoure l'ion permet la fixation en surface de l'espèce. Il est aussi important de noter le petit rayon de la sphère d'hydratation par rapport à d'autres comme celle du sodium, dû à sa forte charge, ce qui implique une grande force d'interaction avec les plaquettes argileuses [8]

D'après l'ensemble de résultats obtenus pour le milieu calcique dans [8] les affirmations suivantes peuvent être faites :

- 1) L'adsorption des ions Ca^{2+} sur les couches basales siliceuses se produit par le mécanisme montré sur la figure 10, ayant comme conséquence la formation d'une couche adsorbée de composition globalement neutre :



où les six molécules d'eau représentent la sphère d'hydratation entourant l'ion calcium.

- 2) En considérant que les ions calcium ont été ajoutés à la solution sous la forme de chaux $Ca(OH)_2$, les surfaces latérales d'une argile quelconque seront négativement chargées en raison du pH basique.

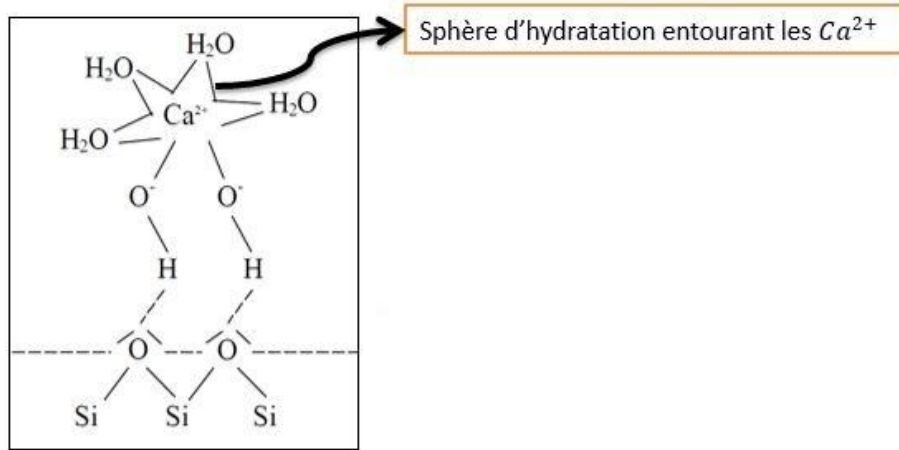
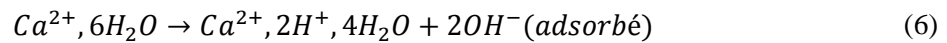


Figure 13 : interaction de la sphère d'hydratation des ions calcium (qui a pour composition $Ca^{2+}, 6H_2O$) avec la surface basale siliceuse.

- 3) Des expériences sur le comportement rhéologique de différentes solutions argileuses [8] portent à la conclusion que dans le cas de la kaolinite (argile de type TO donc une surface basale siliceuse et une autre alumineuse) la charge positive se concentre sur les surfaces alumineuses.

Ceci peut être expliqué à partir de la compréhension du mécanisme d'adsorption dans la couche octaédrique expliqué précédemment qui pour le cas du calcium peut être résumé avec la réaction suivante



Dans ce cas, donc, en raison de la nature chimique de la couche, ce seront les ions hydroxyles qui seront retenus dans la surface, au lieu des protons H^+ comme c'était le cas dans la surface siliceuse.

Les trois conclusions extraites pour le cas du calcium et la kaolinite seront, dans la suite du rapport, généralisées pour un cation quelconque. La réaction (5) aura lieu pour une surface siliceuse, et (6) pour une surface alumineuse, quel que soit le type d'argile.

D) LE TRAITEMENT AUX LIANTS HYDRAULIQUES

I) Mise en place du traitement

La réalisation des couches de forme lors du traitement aux liants comporte plusieurs étapes, et différents études sur le sol doivent être envisagées avant la mise en place du traitement. Le niveau d'exigence de ces études peut être de niveaux 1, 2 ou 3 en fonction du besoin d'amélioration du sol [13]. Une fois le degré d'exigence déterminé, commence le traitement proprement dit. Il se compose de différentes opérations élémentaires, qui doivent être exécutées selon un ordre rigoureux établi dans la GTS [13]. La liste et l'ordre de ces opérations sont montrés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Liste des opérations à réaliser lors du traitement, placé en ordre descendant d'exécution : Le malaxage peut aussi se réaliser avant de l'épandage.

<i>Préparation des sols</i>
<i>Épandage des produits de traitement</i>
<i>Malaxage en place</i>
<i>Fabrication en centrale (optionnelle)</i>
<i>Compactage</i>
<i>Ajustement de l'état hydrique</i>
<i>Réglage</i>
<i>Coulage</i>
<i>Protection superficielle</i>

Le déroulement général du traitement est le suivant :

La préparation du sol est essentielle pour que le traitement soit efficace, il s'agit surtout de l'homogénéiser de façon à ce que la prise du liant se fasse partout dans la couche de forme. Il peut être utile d'effectuer une décohésion du sol à l'aide d'un buteur [13] (figure 28, annexe II), cela va permettre d'éliminer les gros blocs et faciliter le malaxage ou l'arrosage qui vont suivre.

Une fois ces préparations terminées, le liant peut être ajouté au sol à l'aide d'un épandeur (figure 30, annexe II), c'est une étape délicate car il faut verser avec beaucoup de précision et soigneusement le liant pour que la couche dispose bien de la bonne quantité prévue dans les études préliminaires [13].

Ensuite il faut procéder à une homogénéisation des matériaux en place par malaxage car la taille maximale tolérée est de 50 mm pour les grains et la teneur en eau doit être ajustée (séchage ou arrosage selon les cas) lors du malaxage pour une meilleure homogénéisation encore une fois de l'état hydraulique du sol.

Tout d'abord il faut effectuer un malaxage en place au pulvimalaxeur, (figure 29, annexe II) avec un léger compactage entre deux passages pour atteindre la profondeur de la couche de forme que à réaliser. Un premier fort compactage, réalisé avec un compacteur puissant comme celui montré en annexe (figure 31), doit être appliqué (toujours dans le délai de maniabilité) avant le réglage fin pour niveler la couche grâce à une niveleuse.

Enfin pour terminer l'élaboration de la couche de forme, une opération de cloutage au préalable de la protection superficielle de la couche en épandant des roches dures (entre 14 et 20 mm de diamètre) va faciliter ensuite l'accrochage de la protection et améliorer l'interaction avec la couche supérieure qui sera construite par-dessus. Un deuxième compactage [13] est indispensable pour limiter les échanges d'eau avec le milieu extérieur qui peuvent enrichir ou appauvrir la teneur en eau du mélange et ainsi perturber la prise du liant.

II) Définition d'un liant hydraulique

Il faut maintenant aborder les aspects de la composition d'un liant, pour comprendre comment se produit le développement de résistance lors du traitement. Les liants hydrauliques [14] sont les liants les plus utilisés pour la construction. Il s'agit de produits qui, en présence d'eau, s'hydratent en donnant naissance à des espèces cristallines. Ces dernières étant insolubles et résistantes, elles vont créer des liaisons chimiques et physiques avec les différents éléments granulaires du sol. Ce

phénomène est appelé « prise hydraulique » ou aussi « hydratation », il donne au sol une cohésion permanente qui va dépendre de plusieurs facteurs [4] :

- le type de liant,
- la nature du sol (impuretés chimiques, granulométrie...),
- la quantité de liant introduite,
- la compacité atteinte à la mise en œuvre,
- la température du milieu,
- l'âge du mélange.

Les liants hydrauliques sont des mélanges de différents composants formulés avec des proportions adaptées au mieux au sol à traiter.

III) Liants hydrauliques routiers ou LHR

Ils existent des liants formulés spécifiquement pour le domaine des routes, qui permettent d'effectuer les traitements nécessaires d'amélioration de la résistance à compression. Une liste des LHR disponibles dans l'est de la France est donnée dans l'annexe I.

i. Avantages

Sur le plan technique, la formulation des liants hydrauliques peut varier selon les besoins du projet que l'entreprise doit effectuer. En effet, ils peuvent s'adapter au type de sol rencontré et être optimisés pour avoir une cinétique de prise ajustée aux conditions de travail. Ce qui veut dire que les liants hydrauliques routiers, peuvent être formulés et usinés pour un traitement de sol bien spécifique.

Sur le plan économique, [14] leur fabrication ne nécessite pas d'utiliser des techniques de fabrications très poussées. En effet, leurs formulations font en partie appel à des sous-produits de l'industrie, permettant aux liants d'être dans une gamme de prix plus abordable que certains ciments.

ii. Domaines d'emploi et limite d'utilisation

La norme européenne qui classe l'utilisation des liants est la NF EN 13282, selon les différentes utilisations du liant.

Tout d'abord, pour le traitement des sols sur les parties supérieures des terrassements. Dans ce cas, le traitement du sol se fait à la chaux ou alors aux liants hydrauliques.

Dans un deuxième temps, les liants sont utilisés pour la réalisation de couches d'assise de chaussée à l'aide de graves traitées aux liants hydrauliques routiers. Les graves sont un granulat rencontré dans les mélanges de sable et de gravillons qui sont utilisés sous la couche de finition, c'est-à-dire en dessous du dallage de béton ou alors pour une route de l'enrobé bitumineux de couverture.

Les liants hydrauliques utilisés dépendent des analyses sur les propriétés d'un sol particulier. Il faudra au préalable de l'application du liant sur le sol connaître sa composition minéralogique et chimique. En effet, la présence dans un sol de matières organiques, de soufre, sulfates et/ou chlorures peuvent perturber voire empêcher la prise du liant hydraulique ou alors qui risque de provoquer des gonflements importants du sol après le traitement.

iii. Les constituants

a) Les principaux constituants

Le liant hydraulique spécifique au domaine routier est une poudre réalisé par broyage de un ou plusieurs constituants :

- **le clinker** : composant du ciment artificiel qui est produit après la cuisson d'un mélange d'environ 80% de calcaire et de 20% matériaux aluminosilicates comme notamment des argiles qui apportent au clinker du silicium, de l'aluminium et du fer.
- Des **sous-produits** d'autres industries tels que les laitiers, et des cendres volantes, qui auront subi une préparation plus élaborée si nécessaire.
- Des **produits naturels** qui subiront selon leur degré d'implication dans la formulation du liant un traitement de séchage et une pulvérisation.
- Un **activant de prise**, généralement de la chaux.

Ces différents constituants apportent aux liants diverses propriétés. Dans un premier temps des propriétés hydrauliques : elles permettent au produit de durcir à froid mais pas seulement dans l'air aussi dans l'eau. Elle produit aussi l'ajout de propriétés pouzzolaniques qui est l'aptitude d'un produit à obtenir des propriétés hydrauliques par l'ajout de corps réactifs, comme énoncé précédemment ici ce sera la chaux. C'est à dire, des propriétés physiques qui vont améliorer les qualités du liant comme sa compacité ou la diminution de la perméabilité vont être apportées au liant.

Certains liants hydrauliques routiers possèdent plusieurs de ces propriétés car ils peuvent être formulés pour traiter un sol bien spécifique. Cette formulation plutôt souple permet de faire varier les propriétés des liants.

De plus, les constituants principaux des liants doivent être conformes à la norme NF EN 197-1. Les constituants sont les suivants :

- le Clinker Portland,
- le laitier de haut fourneau,
- des matériaux pouzzolaniques (naturelles),
- des cendres volantes siliceuses et calciques,
- la chaux,
- des schistes calcinés,
- le calcaire.

b) Le clinker

C'est un produit constitué de majeure partie d'aluminates de calcium anhydre et de silicates, obtenu par un processus de cuisson jusqu'à fusion partielle appelée clinkérisation à 1450 °C. Ce produit est obtenu à partir d'un mélange de calcaire et d'argile en proportion respective de 80 et 20 %.

- La chaux CaO (60 à 67%).
- La silice SiO_2 (19 à 25%).
- L'alumine Al_2O_3 (2 à 9 %).
- L'oxyde de fer Fe_2O_3 (1 à 5%).

Le clinker est une poudre dont la masse volumique, la granulométrie ou encore la surface spécifique sont mesurées. La masse volumique des différents clinkers varie entre 3,05 et 3,20 kg/L, tandis que la surface spécifique varie entre 2500 et 4500 cm^2/g .

Cet élément est à la base de la fabrication des ciments et de certains liants hydraulique routiers à durcissement rapide. Les liants composés de clinker sont de très bons liants hydrauliques routiers pour des travaux nécessitant d'un temps de prise très rapide.

Ils associent cinq composés anhydres (la notation utilisée pour les formules fait référence au tableau 4) :

1. les silicates tricalciques , C_3S
2. les silicates dicalciques , C_2S
3. les aluminates tricalciques, C_3A
4. les aluminoferritestétracalciques C_4AF
5. le gypse, $C\bar{S}H_2$

c) La chaux

La chaux est obtenue par cuisson de roches calcaire entre 900 et 1200 °C. On distingue plusieurs types de chaux :

- la chaux aérienne si la roche de base est un carbonate pur,
- la chaux hydraulique si elle contient de l'argile (à hauteur de 20%),

La chaux vive résulte de la calcination d'un carbonate et celle ayant subi une hydratation est appelée chaux éteintes. La chaux intervient comme activant de prise, elle permet de dissoudre la phase vitreuse du laitier et la mise en solution de l'alumine, de la silice et d'elle-même. Ils vont ensuite réagir entre eux et former des aluminates et silicates de calcium hydratés.

IV) Les réactions d'hydratation

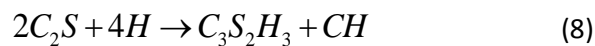
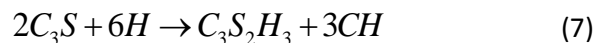
Dans cette partie, les réactions qui ont lieu au sein du mélange liant-eau sont présentées de façon synthétique avec des petites descriptions de chaque hydrate formé, car finalement ce sont les interactions des liants avec les argiles intéressent, et qui seront abordés une fois l'influence sur le développement de résistance de chaque composé produit lors de la prise a été établi. Pour alléger la notation des composés et les réactions, la nomenclature donnée dans le tableau 4 est utilisé généralement dans la littérature pour se référer à différentes espèces chimiques présentes dans la pâte de ciment. Cette nomenclature sera alors utilisée dès maintenant pour se référer à chaque composante.

Tableau 4: Notation cimentière pour les composants principaux d'une pâte de ciment pure.

Notation	Formule chimique	Nom
A	Al_2O_3	alumine
C	CaO	chaux vive
F	Fe_2O_3	ferrite
H	H_2O	eau
S	SiO_2	silice
S̄	SO_3	sulfate
C/A	CaO / Al_2O_3	rapport chaux vive / alumine
C/S	CaO / SiO_2	rapport chaux vive / silice
C₂S	$(CaO)_2.SiO_2$	silicate dicalcique
C₃S	$(CaO)_3.SiO_2$	silicate tricalcique
C₃A	$(CaO)_3.Al_2O_3$	aluminat tricalcique
C₄AF	$(CaO)_4.Al_2O_3.Fe_2O_3$	aluminoferrite tétracalcique
C\bar{S}H₂	$CaSO_4.2H_2O$	gypse
CH	$Ca(OH)_2$	portlandite ou hydroxyde de calcium ou chaux hydratée
CSH	$3(CaO).2(SiO_2).3(H_2O)$	tobermorite ou silicate de calcium hydraté
CAH	$2(CaO)_3.(Al_2O_3).8(H_2O)$	aluminat de calcium hydraté
CASH	$3(CaO).(Al_2O_3).(SiO_2).6(H_2O)$ $2(CaO).(Al_2O_3).(SiO_2).8(H_2O)$	aluminosilicates de calcium hydraté
C\bar{A}SH	$3(CaO).(Al_2O_3).3(CaSO_4).32(H_2O)$	ettringite primaire ou trisulfoaluminat de calcium hydraté
CASH	$3(CaO).(Al_2O_3).(CaSO_4).32(H_2O)$	ettringite secondaire ou monosulfoaluminat de calcium hydraté

Chacun des 5 composants anhydres du clinker réagit de façon différente une fois l'eau est ajoutée au ciment en poudre, donc la pâte de ciment hydratée est ainsi constitué de :

Silicates de calcium hydratés (CSH) issus de¹ :



Les CSH sont les composantes qui donnent la résistance à la pâte, représentant 60 % à 70 % de la pâte, et donc la réaction est la responsable majoritaire de son apparition [3] (une grande partie de la masse du clinker est composé d'alite). Ils ont une structure mal cristallisée de type gel.

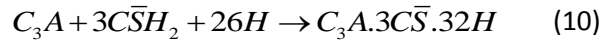
La portlandite (CH) issue de l'hydratation des silicates ((7) et (8)) est aussi un hydrate majoritaire de la pâte et bien qu'elle participe peu au développement de la résistance, cette phase constitue une source essentielle de calcium pour les réactions pouzzolaniques (réactions différées d'hydratation).

Les aluminates de calcium hydratés (CAH) issus de l'hydratation rapide et très exothermique des aluminates tricalciques à partir de la réaction suivante :



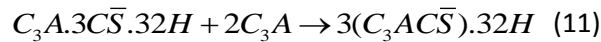
¹ toutes les réactions détaillées dans cette partie sont les réactions globales d'hydratation, qui sont le résultat des différentes étapes données par la cinétique chimique.

Les CAH contribuent légèrement à la résistance ; à conséquence de la très rapide hydratation des CAH, la malléabilité de la pâte peut être diminuée au début de la prise, ce qui gêne sa mobilité. Avec l'objectif d'empêcher la réaction (3) le gypse est utilisé comme un régulateur de prise qui réagit avec les aluminates de calcium :



L'**ettringite primaire** est le produit de la réaction (4) ; elle a une structure trigonale qui macroscopiquement donnent des aiguilles fines insérées dans la pâte. Elle se développe autour des grains d'aluminate de calcium et diminue ainsi le contact avec l'eau. Au moment du développement de cette phase, l'hydratation des autres anhydres (réactions (1) et (2)) n'a pas encore commencé.

L'**ettringite secondaire** issue de la réaction des C_3A avec l'ettringite selon :



Le développement de l'ettringite secondaire est très retardé par rapport à la prise initiale, peuvent apparaître quelques années après la solidification de la pâte. En gros, les sulfoaluminates de calcium occupent un 5-15% du volume de la pâte de ciment hydratée.

V) Les réactions pouzzolaniques.

Lors de la prise des liants, ils existent aussi d'autres réactions chimiques, dont la réaction de prise pouzzolaniques. Ces réactions sont susceptibles de se déclencher quelques semaines après l'hydratation du liant. Elles se produisent en fonction de la minéralogie du matériau à traiter, et de son pH voire la quantité de calcium disponible dans le milieu. La figure 14 permet d'expliquer les processus de dissolution et de précipitation.

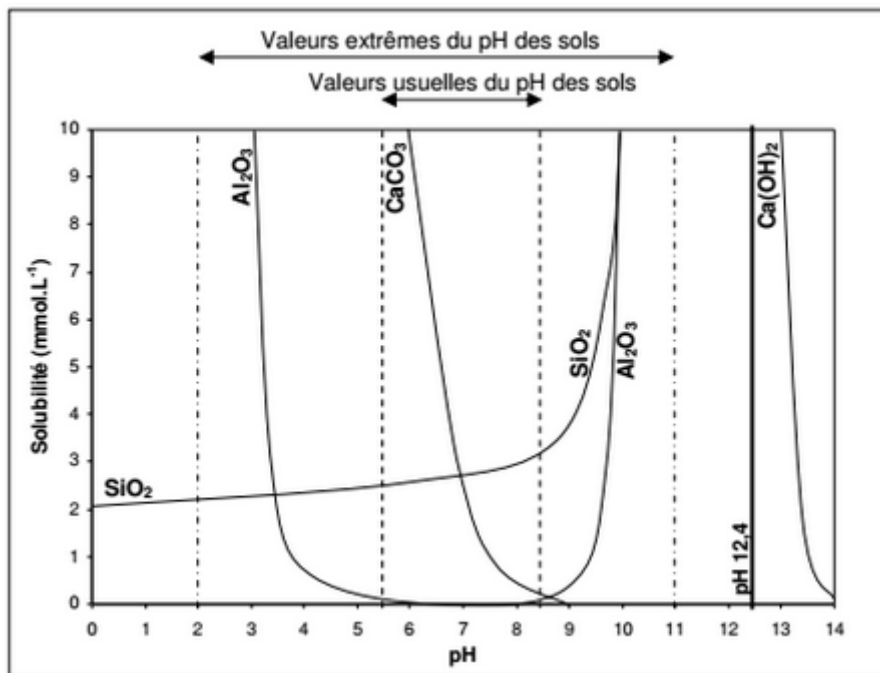
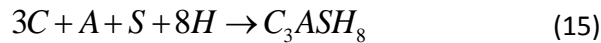
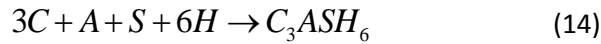
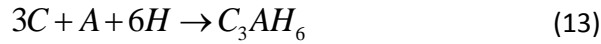
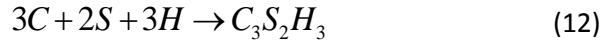


Figure 14 : Diagramme de dissolution/précipitation des phases cimentaire en fonction du pH.

A la valeur pour laquelle le pH est égal à 12,4, les molécules de silice présentes, et celles d'alumines réagissent avec le calcium apporté par les produits de traitement pour former de nouveaux hydrates tel que les CSH (réaction 1), les CAH, (voir réaction (2)) et les aluminosilicates de calcium hydratés (notés CASH, voir réactions (3) et (4)).



La nature et la quantité des espèces formées au cours de ces réactions dépendent directement des argiles présentes dans le sol. La formation de ces nouveaux hydrates lance une seconde phase de développement des performances mécaniques. En effet, la résistance du sol va évoluer lentement après une trentaine de jours.

L'ajout de chaux provoque une augmentation du pH, qui va diminuer avec l'âge suite à la consommation des ions OH lors de la formation des différents composés listés ci-dessus. D'après [15], il est prévisible qu'au bout d'un certain temps le pH ne serait plus suffisamment élevé pour entraîner les réactions pouzzolaniques, mais ce seuil de pH reste inconnu [3]

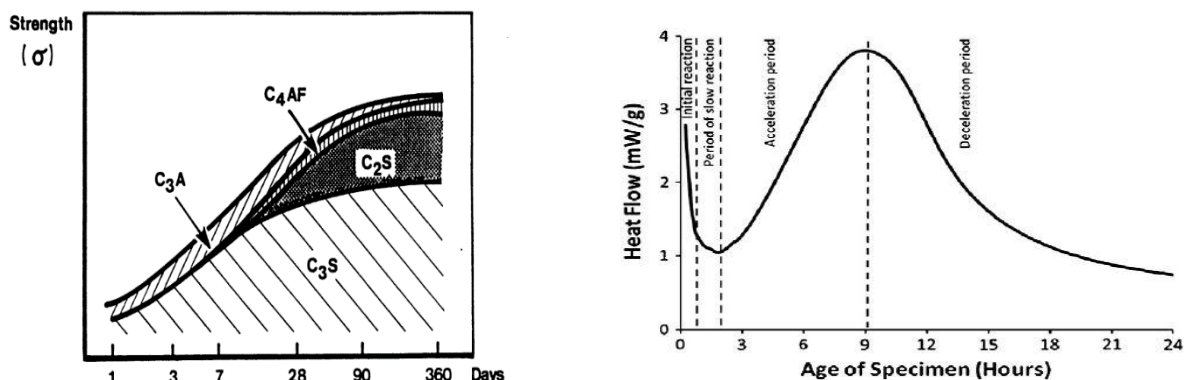
VI) Cinétique de la prise d'un liant hydraulique

i. Motivation de cette partie

Le but de cette partie est de prendre connaissance des différentes étapes nécessaires pour la formation d'espèces liantes dès le moment de la mise en contact du liant avec de l'eau. Il est nécessaire d'avoir une base. Pour simplifier, les systèmes étudiés seront réduits aux dissolutions de C_3S puisque cet oxyde anhydre est le principal facteur de l'augmentation de la résistance du ciment, car sa réaction d'hydratation est ce qui génère le plus de CSH et qui contrôle la cinétique dans les premières étapes de la prise [16].

Sur la figure 15, les éléments liés à l'augmentation de la résistance de la pâte de ciment sont montrés, tel que les principaux composés anhydres. Effectivement, le C_3S est le principal élément responsable de l'augmentation de la résistance de la pâte.

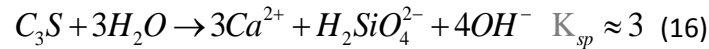
Figure 15 : À gauche : évolution de la résistance de la pâte en différenciant les contributions de chaque composante anhydre ; à droite : ITC qui montre l'évolution de l'hydratation de l'alite, séparant les différentes étapes.



La vitesse d'hydratation du ciment portland, comme des solutions de C_3S évolue de façon non linéaire (figure 15 à droite), le processus est donc divisé en différentes étapes, 4 dans le cas de la figure 15 [16], le début et la fin desquelles sont difficiles à préciser [16].

ii. Période initiale (initial period) et période de réaction lente (slow reaction period)

La figure 15 à droite montre que pendant la période initiale de l'hydratation, il y a des réactions donnant des pics très exothermiques sur la courbe d'ITC. Le temps de réaction est aussi très rapide. La réaction est



Néanmoins la vitesse de dissolution de l'alite diminue rapidement au cours de la réaction. Comme la vitesse n'a pas encore arrivée au point de saturation, la solution est encore très insaturée au début du période de réaction lente²: [16].

iii. Période d'accélération (acceleration period)

Il est normalement accepté que la réaction pendant cette période suive un mécanisme de nucléation et croissance (N+G) sur les surfaces libres d'alite et probablement aussi sur les surfaces d'autres minéraux présents à l'échantillon. La nucléation a lieu de façon hétérogène et très rapidement.

iv. Morphologie et mécanisme de croissance de CSH

Dans la théorie la plus acceptée, des tétraèdres de silicates sont ajoutés l'un après l'autre dans des chaînes de silicates en 2D, formant des lamelles entre lesquelles des hydroxyles et des ions calcium sont incorporés. Les lamelles ont une longueur d'à peu près 5 nm. Néanmoins, des défauts cristallins sont développés dans les lamelles induisant à la séparation des lamelles entre elles (apparition des contraintes dans le réseau). Ce mécanisme pourrait expliquer de cette façon les nanoparticules de CSH observées dans certains cas (en s'imaginant des domaines de lamelles avec trop de défauts cristallins).

Par rapport à la morphologie, deux types de CSH sont observées dans des pâtes âgées^[11]; HD (« high density ») et LD (« low density »), donc qui ont des « packing factors » très élevées et très faibles respectivement.

v. Période de ralentissement

Il n'y a pas beaucoup de recherche effectuée sur cette étape de l'hydratation. Il est majoritairement accepté que le processus se déroule grâce à un mécanisme de diffusion vers la solution, mais c'est seulement le cas loin du pic d'hydratation (c'est-à-dire loin de la fin de l'étape d'accélération). D'autres facteurs à tenir en compte dans cette étape sont :

- 1) la teneur en eau
- 2) l'espace disponible
- 3) la consommation des particules plus fines de C_3S , laissant seulement les plus grandes

À la fin de la période d'accélération, des interférences apparaissent entre les différents domaines de CSH qui se sont développés le long du mécanisme de N+G, qui expliquent la transition de la période de ralentissement. Une fois que la chaleur émise par la réaction est descendue presque à 0 sur le diagramme ITC de la figure 15, des parois très épaisses sont formées qui divisent la solution des

² Les différents mécanismes qui expliquent l'étape de réaction lente peuvent être consultés dans les annexes

particules mais qui n'ont encore réagi totalement. La transition au régime de diffusion, (supposant que vraiment cette transition aurait lieu) se passerait une fois ces barrières seraient formés.

Cependant, d'autres expériences apportent encore plus données qui ne confirment pas ce « régime de diffusion » [16].

VII) Modèle microstructural de solidification

Avant de parler des perturbations du traitement aux liants, il est important d'avoir à l'esprit une vision de l'ensemble du système à traiter. Pour cela, un modèle microstructural du sol lors d'un traitement mixte ciment-chaux est présenté³.

Ce modèle est applicable aux sols de type A1, A2 et B5 (voir figure 2) avec une composition de liant de 1% de chaux et 5% du ciment CEMII/B 32.5 [2]. Le sol est un assemblage de divers minéraux (argiles, calcite, quartz, etc.) de différentes tailles et de fluides interstitiels occupant les pores. Le mécanisme est le suivant :

- 1) l'action mécanique du malaxage découpe le sol en agrégats de minéraux de taille centimétrique à décimétrique ;
- 2) l'ajout de chaux provoque la floculation des argiles. Ce réarrangement des particules du sol fait place à un ensemble d'agrégats ou grumeaux (limites en pointillés noirs sur la figure 16)
- 3) les grumeaux s'agglomèrent lors du compactage, laissant entre eux une porosité ;
- 4) les hydrates produits forment une coque externe autour des grumeaux, qui les lie entre eux.
- 5) en conséquence des réactions pouzzolaniques, des nouveaux hydrates viennent renforcer les liaisons entre les grumeaux après 90 jours de cure normale.

La figure 16 montre la microstructure en grumeaux décrite par ce modèle. Les argiles sont présentes à l'interface de contact entre les grumeaux et la coque hydratée.

Cependant ce modèle n'est pas toujours valable ; des expériences montrent que dans des sols traités seulement à la chaux la structure en grumeaux n'apparaît pas, malgré la présence de réactions pouzzolaniques sur la matrice [2]. Ainsi le traitement aux liants hydrauliques semble donc important pour figer la structure dans une coque d'hydrates.

³ Il faut être critique avec ce modèle, puisque même si le processus du traitement est très semblant à ce du liant hydraulique seul, des différences pourrait apparaître au niveau de la microstructure développée.

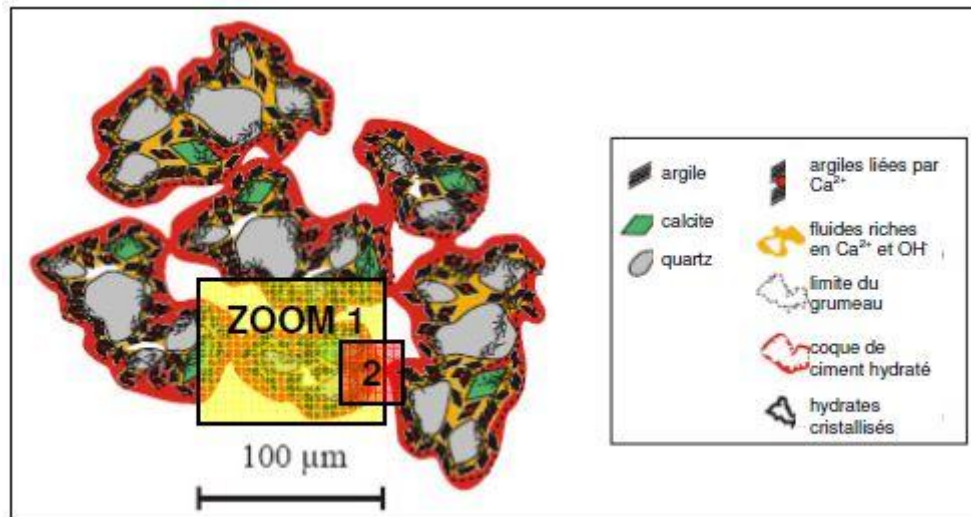


Figure 16 : Schéma du modèle microstructural pour les sols A1, A2 et B5. [6]

E) Perturbations de la prise liées aux échanges cationiques

Les différences rencontrées dans la composition des sols induisent pour certains types de liants des perturbations dans les réactions d'hydratation. Les liants hydrauliques vont directement interagir avec les argiles et autres composés présents dans le milieu, mais seuls les facteurs de perturbation liés aux argiles seront considérés ici. Évidemment le traitement donné au sol doit être pris aussi en considération : à la chaux, aux liants hydrauliques ou mixte.

Dans le cadre de ce projet, l'influence de l'addition d'un LHR à un sol argileux doit être étudiée ; pour cela un traitement avec seulement un liant, (sans rajouter une source de calcium autre que le propre liant) sera réalisé. Il faut connaître quels sont les facteurs de perturbation liés aux argiles dans ce type de traitement concret. Les échanges ioniques propres des matériaux argileux sont certainement des processus qui interviennent lors de la prise, et seront donc ensuite traités :

I) Phénomènes d'échange ionique dans le traitement aux liants hydrauliques :

Pour les différentes familles d'argiles-pour l'intérêt de ce projet : la kaolinite, l'illite et la smectite-l'échange cationique ne se fait pas de la même manière. Par exemple la kaolinite fixe les cations uniquement sur les zones latérales de ses feuillets alors que la smectite et l'illite captent des cations sur leurs surfaces externes et internes [4].

i. La floculation/agglomération des plaquettes argileuses

À partir des conclusions de l'exemple d'adsorption du calcium, le mécanisme de floculation des argiles peut être déduit à partir des interactions entre les différentes surfaces chargées des plaquettes:

Soit le cas d'une argile TO comme par exemple la kaolinite ; l'adsorption des ions calcium lors de l'hydrolyse du ciment (normalement à pH basique) a pour conséquence l'accumulation d'une charge

positive sur les surfaces basales octaédriques et l'accumulation d'une charge négative sur les tétraédriques. En même temps, en raison du pH basique, les surfaces latérales sont faiblement chargées négativement. Ceci a pour conséquence l'attraction entre surfaces de signes opposés, ce qui induit l'union des plaquettes argileuses de type TO. Par contre, les argiles de type TOT sont complètement entourés de charges négatives (aucune surface basale alumineuse), donc l'adsorption du calcium a généralement un effet dispersant (ceci est le cas de l'illite par exemple) [8]

Néanmoins la montmorillonite est une exception car il faut considérer aussi les effets gonflants, très importantes dans ce type d'argile.

Dans le modèle microstructural pris comme référence pour l'étude, les hydrates calciques vont cristalliser autour des grumeaux, formant une coque externe qui les relie. Il est important, donc, d'avoir un milieu suffisamment compact pour le développement des espèces liantes.

Pour illustrer cet effet, [2] une expérience qui fait l'étude de deux limons qui présentent différentes réponses à un traitement mixte chaux plus liant est rapportée. Les minéraux argileux qui sont présents dans le limon de Louches sont la kaolinite, la montmorillonite et de l'illite/muscovite. On remarque que la structure du limon de la figure 17 à gauche (limon LVE) est beaucoup plus homogène que celle de la droite (limon de Louches).

En effet, après traitement très peu de pores intra-agrégats dans le limon LVE sont distingués ; ce résultat est le produit des réactions d'hydratation du ciment (incluant les pouzzolaniques) qui ont conduit à la formation d'un gel liant qui recouvre la surface du limon. Ce gel permet d'homogénéiser la microstructure partout et donc augmente considérablement ses propriétés mécaniques lors de la croissance des hydrates.

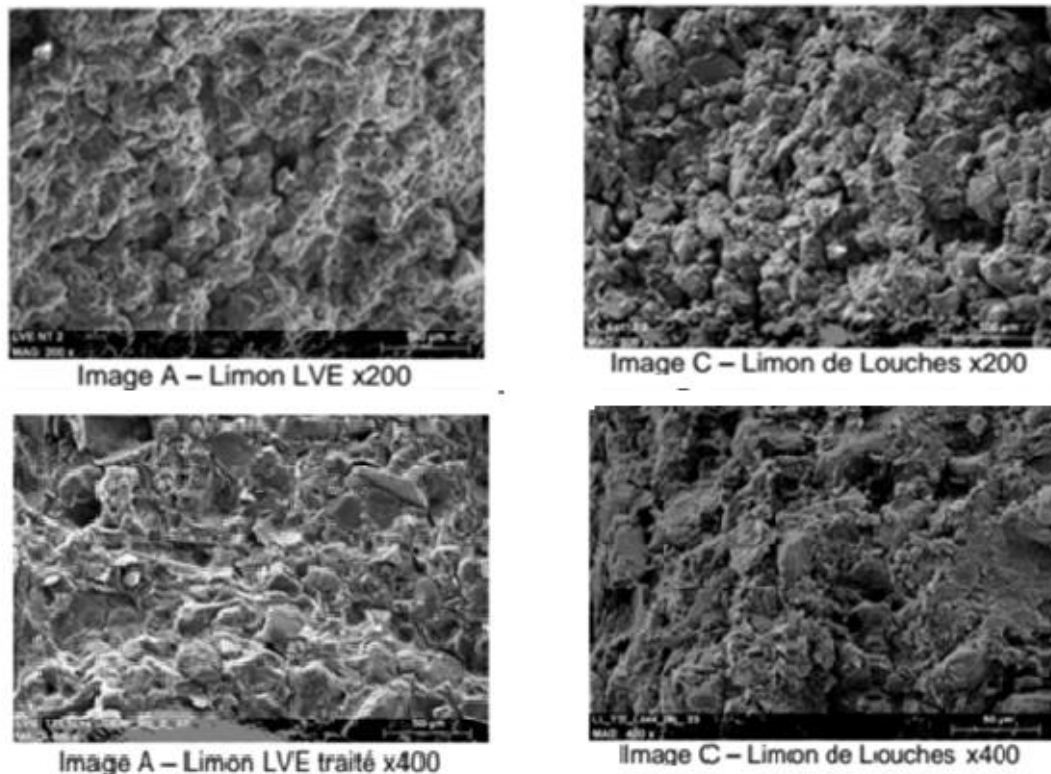


Figure 17: A droite : image MEB du limon de Louches sans traiter (partie supérieure) et traité (partie inférieure), et à gauche : limon LVE sans traiter (partie supérieure) et traité (partie inférieure).

Contrairement au cas précédent, l'ajout de chaux et de ciment dans le limon de Louches ne conduit pas à la formation de cette microstructure typique d'un limon après le traitement. On observe toujours de très grands pores intra-agrégats.

Il n'y a aucune liaison entre les différents composants du limon. Lorsque l'image est agrandie, le développement de composés cimentaires à la surface des agrégats est très limité. En effet, les particules fines qui dans le LVE font la liaison entre les agrégats sont moins abondantes dans celui de Louches. C'était déjà constaté dans les images du limon avant traitement, puisque les agrégats n'étaient pas liés entre eux, du fait de cette absence de particules fines. Ce déficit explique donc le problème que cause l'absence de fines dans les limons. Le gel ne peut pas s'étendre correctement de grain en grain car il n'y a pas ou trop peu de liaison entre eux.

ii. L'adsorption des ions calcium Ca^{2+}

D'après les travaux de Ben Amor sur la stabilisation des argiles grâce aux liants, 100 g de kaolinites (argile TO) fixent environ 0,3g de Ca^{2+} et les smectites (argile TOT) sont capables de fixer environ 0,6g de Ca^{2+} pour 100g.

Les cations qui ont réagi avec les argiles ne sont plus disponibles pour la prise du ciment. De plus, la quantité de Ca^{2+} libérée pour 100g de ciment est d'environ 1,2 g pendant les 6 premiers jours, cette quantité libérée va ensuite diminuer à environ 0,7 g pendant les jours qui suivent.

La capacité de certaines argiles à capter les cations de calcium Ca^{2+} a été mesurée [5] : un traitement à 40% de chaux suivi d'une cure de 90 j montre que la smectite a totalement consommé les cations Ca^{2+} libérés par le liant tandis que la kaolinite n'en a consommé que les deux tiers environ.

Les résultats obtenus (figure 18) montrent clairement que la smectite (montmorillonite) est en mesure d'adsorber beaucoup plus de cations Ca^{2+} que le ciment peut en libérer lors de son hydrolyse pendant la période initiale de réaction (réaction (10), partie de cinétique de prise), ce qui n'est pas le cas de la kaolinite. [5] Cela favorise donc par déplacement de l'équilibre (10) la dissolution du ciment. Néanmoins, il a été supposé qu'une fois la réaction arrivée au stade d'accélération, le même phénomène gêne la cristallisation des silicates de calcium hydratés (CSH) sur les argiles.

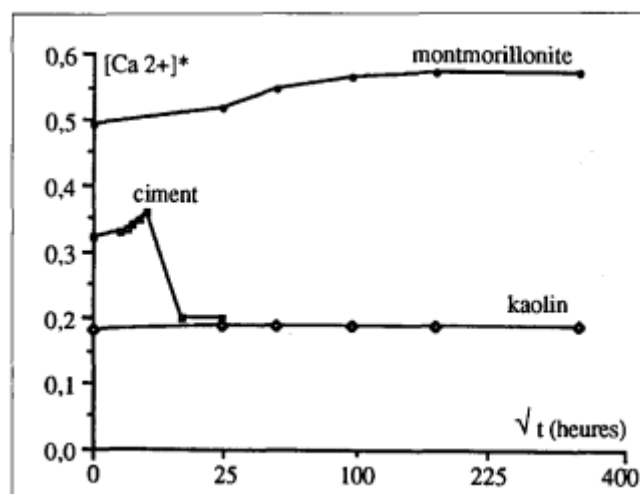


Figure 18: Capacité de captation des ions calcium du kaolin, du ciment et de la montmorillonite (la montmorillonite appartient à la famille des smectites) en fonction du temps.

iii. Formation d'hydrates calciques par dissolution des plaquettes

Les argiles, lorsqu'elles sont dans une solution qui contient de l'hydroxyde calcium, peuvent être dissoutes et former des aluminates et silicates calcique hydratés de surface spécifique élevée, dont la quantité et la morphologie varient selon les conditions du système et le type d'argile. Ceci s'applique aussi à d'autres particules fines comme le quartz [17]

Le mécanisme de la réaction peut être décrit de façon générale comme suit :

- 1) en raison du pH très basique caractéristique des dissolutions argile-liant, les minéraux argileux commencent à se dissoudre progressivement pour les bords des plaquettes, la partie « non attaquée » des plaquettes argileuses garde encore sa structure parfaitement cristalline.
- 2) les produits de la réaction commencent à précipiter.

Dans le cas de la montmorillonite (smectite, par exemple) et la kaolinite, les produits de réaction à température ambiante correspondent à un gel amorphe d'alite ou à une forme allotropique plus cristalline de CSH, résultat de la dissolution des couches siliceuses. En même temps, la dissolution des couches octaédriques encadre la formation d'aluminates de calcium hydratés, qui à température ambiante ont une morphologie hexagonale (voir partie des réactions d'hydratation pour une image de la microstructure au MEB) Néanmoins, la quantité d'espèces liantes formées est beaucoup plus élevée pour le cas de la kaolinite que pour la montmorillonite. [15]

iv. Conclusions liées aux échanges cationiques

D'après les phénomènes expliqués dans les parties précédentes, les problèmes rencontrés dans la prise par rapport aux particules fines peuvent être liés à :

- 1) l'ensemble de phénomènes qui ne permettent pas la formation d'une couche homogène de liant dans le sol, c'est-à-dire de former des liaisons stables. Cela inclue les effets de la faible floculation due à l'absence de particules fines, ne permettant pas la formation de la microstructure de référence, et l'absence de création d'espèces aux propriétés liantes par dissolution des argiles entre les différents agrégats qui composent le sol. La kaolinite par exemple permet de les former, alors que la quantité formée par la smectite (montmorillonite) est très faible.
- 2) Lors de l'hydratation, le liant libère des cations Ca^{2+} , qui par la suite vont être plus ou moins consommés. selon le type d'argile : cela a des conséquences directes sur la cinétique de la réaction de prise
- 3) Le gonflement de certaines argiles est bien sûr le phénomène lié aux particules fines qui influe le plus dans les propriétés mécaniques des sols. Néanmoins, bien que l'origine du gonflement soit liée aux échanges cationiques au sein des plaquettes argileuses, ses effets n'ont été pas étudiés en détail ici, car il s'agit d'un processus déjà très connu dans le domaine du génie civil.

Comme établi dans la GTS, chaque sol a sa teneur en argiles « idéale » pour le développement de la résistance à compression nécessaire pour la couche de forme. Les différents phénomènes d'échange cationique étudiés montrent comment ni l'absence ni l'excès d'argiles sont la solution pour la prise correcte du LHR dans le sol. La compréhension profonde des échanges cationiques et l'implémentation de méthodes de lectures quantitatives sous terrain qui permettent de séparer les différentes sources de perturbation liées aux fines est nécessaire pour pouvoir traiter chaque problème isolé de la reste.

F) EXPERIENCES SUR MELANGES SABLE-ARGILE-LIANT-EAU

I) Objectif des l'expériences

Les trois conclusions extraites de la partie précédente indiquent clairement une influence des argiles sur la prise des liants hydrauliques. Pour confirmer cette affirmation, un plan d'expérience a été établi :

L'expérience consiste en la préparation de différents mélanges avec pourcentages en masse de trois argiles, dans un sol sableux : l'évolution en fonction du temps des résistances à compression de chaque mélange a été suivie pour déterminer quelles argiles posent le plus de problèmes lors de la prise avec un liant hydraulique routier. Préalablement, une recherche bibliographique a été faite pour retrouver la teneur en argiles d'un sol d'Alsace qui pose des problèmes lors du traitement .

II) Cas d'étude : l'Alsace

Le « sol problème » choisi est un type de sol particulier rencontré souvent en Alsace qui pose des problèmes lors d'un traitement au liant hydraulique. La carte de la lithologie (qui décrit la nature des roches constituant une formation géologique) de l'Alsace montre la grande quantité de lœss (figure 19), pour le Bas-Rhin où toutes les zones jaunes et beiges correspondent à des sols lœssiques.

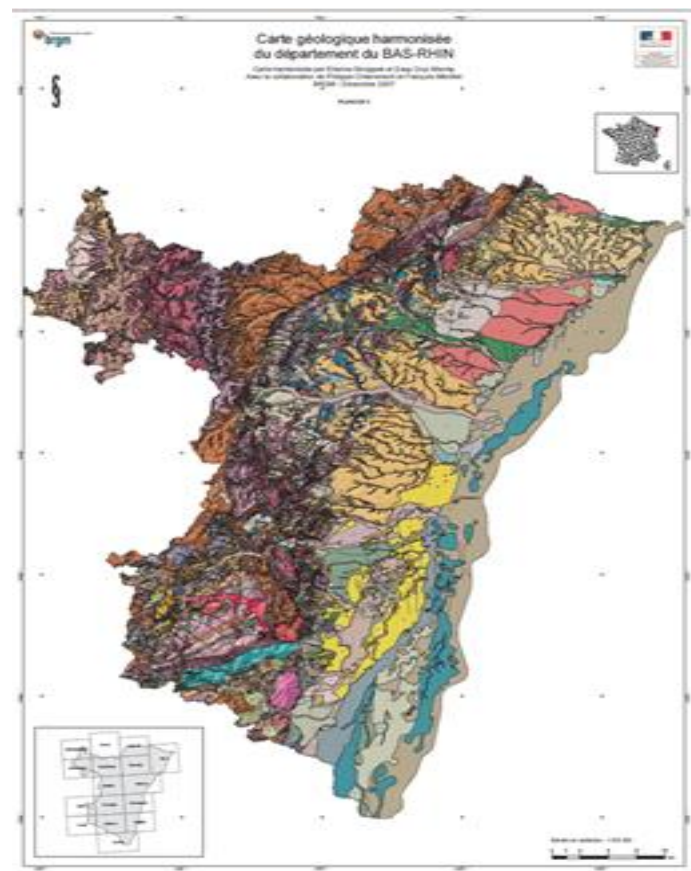


Figure 19 Carte géologique du Bas-Rhin. [18]

Le terme de lœss correspond à un limon jaune clair très souvent fossilifère (notamment de gastéropodes terrestres). Ce type de limon se rencontre aussi dans d'autres régions sous un autre nom : fauvet en Normandie ou encore ergeron pour le Nord de la France [19]. Ce limon étant très fin et assez pulvérulent (poudreux) le sol est considéré une formation lœssique, qui n'est pas totalement homogène car des particules argileuses, sableuses ou caillouteuses y sont retrouvées. ^[7]

Voici la constitution minéralogique des lœss :

- quartz : les minéraux de quartz comportant une fraction fine (la plus importante) constituée surtout d'éclats (aplatis) des grains plus grossiers et sableux qui ont eu des angles émoussés ;
- carbonate de chaux (CaCO_3) : présent sous forme de débris de craie ou de calcaires, de la calcite sous forme de petites particules et des concrétions (réunion de différents corps chimiques et physiques qui se solidifient ensemble) qui peuvent exister sous deux formes différentes : en tubes (autour de racines) ou en « poupées du lœss » beaucoup plus grosses (jusqu'à 10 cm de long) ;
- des argiles (au sens minéralogique) : plusieurs études ont montré la présence majoritaire de l'illite et du chlorite, mais également de la kaolinite et de la montmorillonite.
- D'autres minéraux peuvent être présents selon la localisation et l'histoire géologique du sol en place. Une analyse du sol avant les travaux est donc indispensable. Un autre phénomène est à prendre en compte : l'altération des lœss en lehms qui est la dégradation de la chlorite et qui influe donc sur les fractions en composition des différentes argiles (l'illite devient la fraction la plus importante). [20]

La teneur totale en masse en argiles dans ces sols est estimée à 10% [21]: 7% illites 2,5% smectites, 0,25% de kaolinite, et 0,25% de chlorites. Ce sont principalement des espèces silicatés (54,36%) mais on trouve aussi du calcium, de l'aluminium et du carbone.

Tableau 5 : Analyses chimiques de différents sols lœssiques par Agafonoff, Lee, Meigen et Scherling [7] desquelles la composition minéralogique en argiles peut être extrait

	(1) Environs de Cambrai		Plateau de Villejuif (1) carrière Lafontaine Loess (en %)	Hohnheim environs de Strasbourg (2) Loess (en %)	Loess de Chihli (3) (en %)
	loess décalcifié (en %)	loess (en %)			
SiO_2	72,92	66,38	59,46	54,36	55,70
Al_2O_3	9,47	8,32	7,54	8,05	13,27
Fe_2O_3	5,29	2,71	2,42	2,34	5,10
FeO	0,71	0,40	0,71	0,78	—
MnO	0,09	0,08	0,07	—	—
MgO	0,83	0,77	0,96	3,55	2,37
CaO	0,62	7,66	12,52	14,41	7,15
Na_2O	0,92	1,52	1,16	1,68	1,51
K_2O	1,80	1,65	1,63	1,97	—
TiO_2	0,98	0,58	0,78	—	0,60
P_2O_5	0,16	0,07	0,12	—	0,18
CO_2	0,	5,26	8,58	12,03	8,20
H_2O	2,70	1,45	1,80	1,55	3,20
	3,62	3,02	2,26	—	—
Total (en %)	100,31	99,87	100,01	100,72	97,28

(1) Agafonoff

(2) Meigen et Schering

(3) Lee

Le but de l'expérience étant de comprendre l'influence de ces différentes argiles sur la réaction de prise du liant, finalement seulement la illite, la smectite et la kaolinite ont été testées.

III) Matériel utilisé

i. Mélanges

- 5000 g de sable conforme aux normes EN 196-1 et ISO 679. Etant normalisé ses grains sont de forme généralement isométrique et arrondie même dans ses particules les plus fines. [22]
- 100 g de kaolinite de granulométrie définie montrée sur la figure 26
- 300 g d'illite, acheté de [23], de granulométrie définie montrée sur la figure 25
- 150 g de smectite⁴ de granulométrie définie et montré sur la figure 27
- liant ROC AS dont les caractéristiques sont indiquées dans le tableau 9 en annexes.
- 2 béchers de 500 mL
- 50 flacons stériles de 40 mL (voir figure 25).

ii. Instrumentation

- Machine à compression MTS (EEIGM),
- Balance de précision,
- Étuve,
- Granulomètre laser (Malvern, LRGP).

IV) Plan d'expérience envisagé

Un premier plan a été élaboré en collaboration avec le tuteur industriel qui considérait la possibilité d'effectuer des essais chimiques pour mesurer la CEC en fonction du temps avec des essais au MEB (valeur au bleu de méthylène) finalement ces essais ont pu pas être réalisés. Par contre, des essais de

⁴ N'ayant pas pu acheter de la smectite dans les délais impartis, nous avons acheté du smecta « orange-vanille » et le taux de smectite a été calculé à partir de la composition de ce médicament. Il comporte des additifs organiques de composition inconnue, et nous supposons qu'ils ne perturberont pas l'expérience.

compression pour les différents mélanges à différents temps de prise ont pu être réalisés.

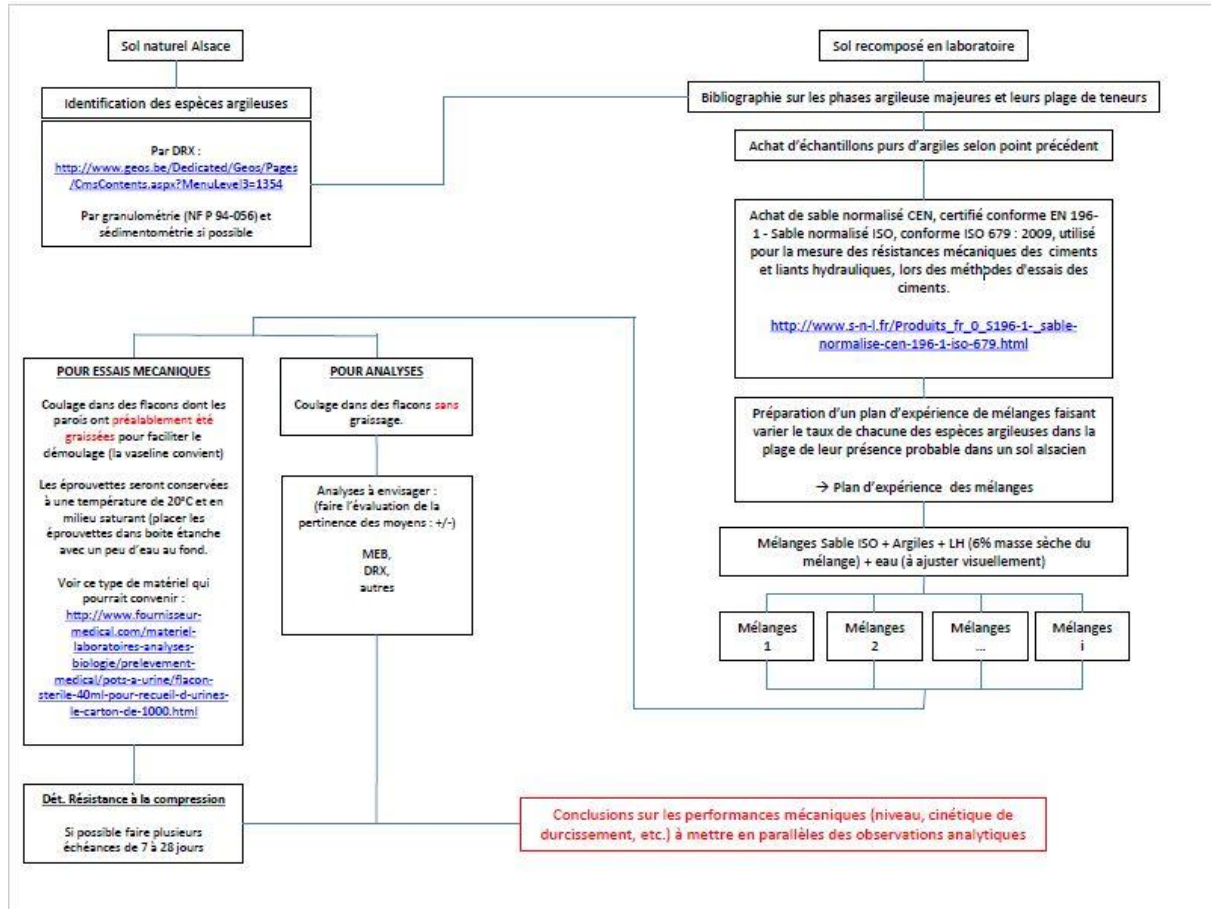


Figure 20 : Plan d'expérience élaboré en conjonction avec le tuteur industriel

Le premier mélange respecte les proportions d'argiles et de sable estimés dans ce sol, sauf pour la chlorite, qui n'est pas incluse (consulter le cas d'étude). Les autres mélanges feront varier la quantité d'une argile pour permettre de voir et de comprendre les interactions avec le liant.

Dans les 4 autres expériences les différents pourcentages d'argiles ont été modifiés de la façon suivante :

Tableau 6 : Tableau détaillant les différents mélanges réalisés.

	Masse sable (g)	Masse liant (g)	Masse illite (g)	Masse smectite (g)	Masse kaolinite (g)
Mélange 1	90	6	7	2.75	0.25
Mélange 2	90	6	7	3	0
Mélange 3	90	6	7	0	3
Mélange 4	90	6	7	0.5	2.5
Mélange 5	90	6	0	7	3

De cette façon les mélanges permettent de considérer les effets séparés de chaque argile.

V) Méthode suivie pour la fabrication des éprouvettes

La méthode suivie été très systématique, chaque mélange montré dans le tableau 6 a été préparé avec la démarche suivante :

- 1) Pesée de chaque composant, puis mélange dans un bécher, jusqu'à l'observation d'un poudre homogène.
- 2) Hydratation du mélange, jusqu'à la formation d'une pâte.
- 3) Prélèvement de 10 échantillons avec les flacons. Sur les 10, 5 ont été graissées avec de la vaseline pour faciliter la sortie des éprouvettes lors des essais mécaniques à réaliser. Les autres 5, sur lesquels les essais du MEB était prévus, n'ont pas finalement pu être utilisés.
- 4) Prélèvement d'un dernier échantillon pour la détermination de la teneur en eau dans l'étuve

Sur la figure 21, les différents composants du mélange numéro 3 sont montrés.

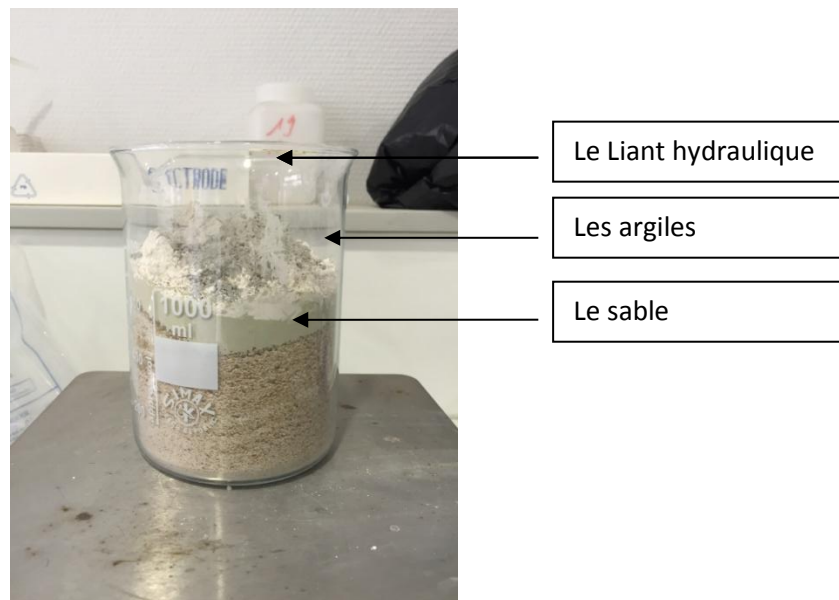


Figure 21: Présentation des composants avant mélange.

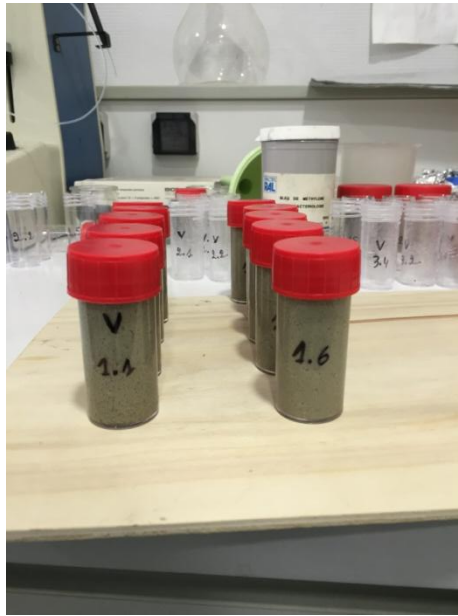


Figure 22: Le premier mélange est entièrement stocké après hydratation.

Sur la figure 22, le premier mélange est entièrement compacté dans les flacons destinés à lui donner une forme de cylindre. Cette forme est plus pratique pour faire des essais en compressions sur les éprouvettes. Les flacons lubrifiés sont ceux marqués avec une lettre V.

VI) Détermination de la teneur en eau de chaque éprouvette

Un flacon passera 48 h à l'étuve à 105 °C pour connaître la masse d'eau se trouvant dans chaque mélange. Les masses des échantillons avant et après étuve ainsi que la masse d'eau de chaque mélange sont données dans le tableau 7.

Tableau 7 : Récapitulatif des masses des échantillons et de la masse d'eau.

	Mélange 1	Mélange 2	Mélange 3	Mélange 4	Mélange 5
Masse avant étuve (g)	103,08	99,78	82,90	99,10	98,30
Masse après étuve (g)	94,46	89,77	75,60	89,18	86,83
Masse d'eau (g)	8,62	12,01	7,3	9,92	11,47

Après cette étape, les échantillons dans la machine de compression et de régler la vitesse de charge qui sera fixé à 1mm/min. Les résultats des expériences sont montrés dans le tableau 7.



Figure 23: Polissage du fond du pot pour extraire l'échantillon.



Figure 24: L'éprouvette en place dans la machine de traction.

VII) Exploitation des résultats

i. Analyse granulométrique des argiles

La taille des particules a été analysée par granulométrie laser. Voici les trois distributions obtenues :

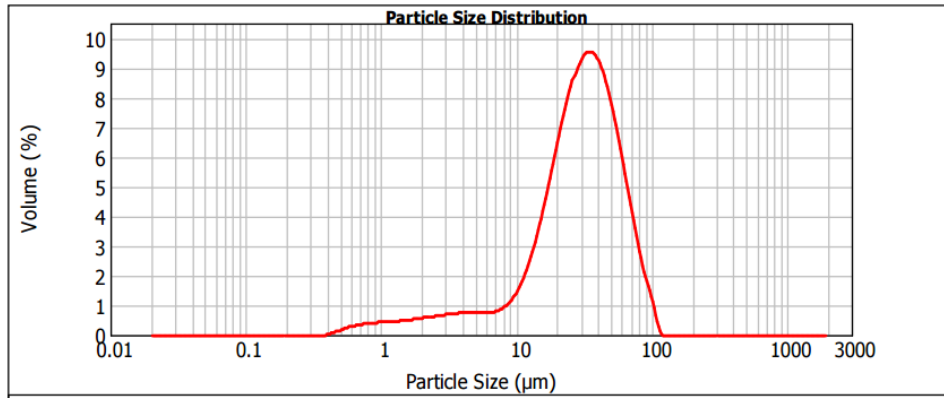


Figure 25: Distributions de taille de particules de l'illite.

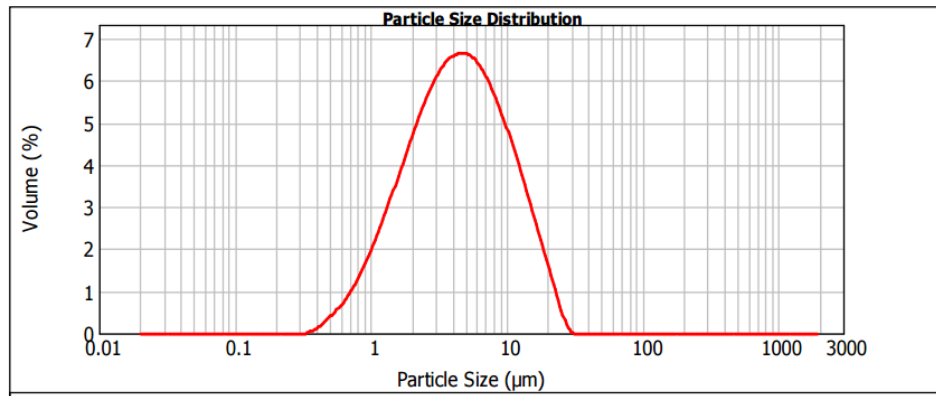


Figure 26: Distribution de la taille de particules de la kaolinite.

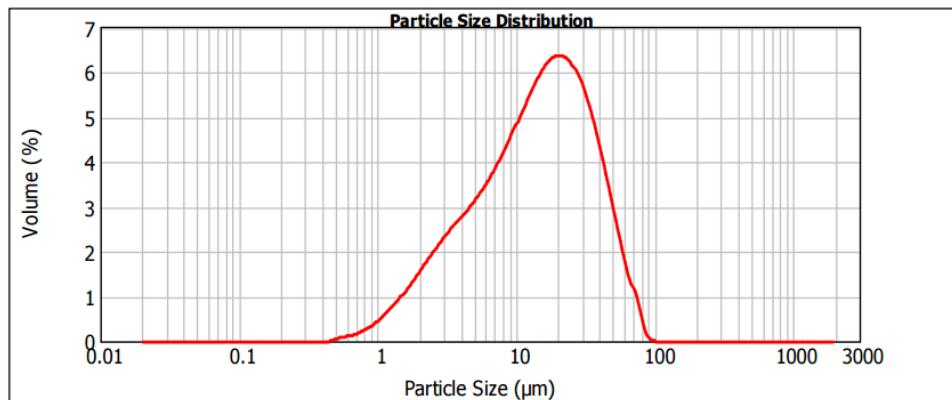


Figure 27: Distribution de la taille de particules de la smectite.

Le diamètre moyen des particules trouvé est de 4,37 μm pour la kaolinite, de 14,4 μm pour la smectite et de 30,4 μm pour l'illite.

Il existe un décalage entre les distributions granulométriques des particules des argiles. En effet, les distributions montrent des particules avec une taille supérieure au diamètre maximal des argiles granulométriques.

ii. Essais en compression

Tableau 8 : Récapitulatif des résistances en compression de chaque mélange.

	Rc à 14j	Rc à 21j	Rc à 28j	Rc à 35j
Mélange 1	5849 Pa	4452 Pa		
Mélange 2	3929 Pa	2640 Pa		
Mélange 3	1,8 MPa	0.7 MPa	0.4 MPa	
Mélange 4	7092 Pa	8640 Pa	0.3 MPa	
Mélange 5	2779 Pa	3341 Pa		

Certains mélanges ne présentaient pas d'augmentation de résistance en compression suffisante, les tests n'ont donc pas été poursuivis sur les échantillons 1, 2 et 5. Les courbes des essais de compressions se trouvent en annexe III.

Les meilleurs résultats en compression ont été obtenus avec le mélange ne comportant pas de smectite. En effet, la smectite utilisée vient du médicament Smecta contenant environ 80% de smectite mais aussi 20% de composés dont la nature n'est pas identifiée. Ces éléments ajoutés au médicament peuvent avoir perturbé la prise du liant. Cette réussite peut être reliée au fait que la smectite soit depuis longtemps connue comme étant un agent gonflant dans le sol. En effet, en absence de smectite l'air s'infiltrera moins dans les éprouvettes ce qui les rendra nettement plus résistantes et moins poreuses. Néanmoins, le fait que la résistance en compression de l'échantillon 3 diminue entre 14 et 21 j semble étrange. L'éprouvette a peut-être été fragilisée lorsqu'elle a été extraite de son moule. Les résultats à 28 j montrent aussi une diminution de la résistance des éprouvettes des mélanges 3 et 4.

VIII) Conclusion et poursuite d'étude

Lors des conclusions de la partie E, la perturbation par les fines de la prise des liants hydrauliques pouvait être liée à trois phénomènes. Néanmoins, il n'a pas été possible de distinguer clairement les trois effets seulement avec des essais à la compression. Il est également été montré que la capacité d'échange cationique joue un rôle dans la perturbation de la prise, car toutes les éprouvettes avec de la smectite ont présenté les premiers jours après le début de la prise des valeurs de R_c beaucoup plus petites que les mélanges qui n'en avaient pas. La smectite est l'argile qui présente le plus de CEC en comparaison avec l'illite et la kaolinite (voir la partie C).

Il faudrait alors trouver des méthodes capables de quantifier séparément les différents effets (gonflement, adsorption du calcium et dissolution des argiles ainsi que floculation) dans la matrice sol. Des modèles théoriques existent, capables de calculer de façon approchée l'épaisseur de la couche de liant formée autour de chaque grain en fonction de la granulométrie [3]. Il serait intéressant de relier les résistances à la compression obtenues dans les expériences à l'épaisseur des couches de liant. De cette façon, un nouveau paramètre non considéré dans cette étude serait testé : l'influence de la taille des particules fines, en tant que particules capables d'uniformiser la texture du sol. [5].

Possibles améliorations des expériences pourraient inclure :

- 1) la mesure du pH en fonction du temps,

- 2) la mesure au bleu de méthylène en fonction du temps,
- 3) la mesure de la quantité d'ions Ca^{2+} adsorbé,
- 4) l'observations au MEB des microstructures formées.

La porosité (d'après compactage) et la teneur en eau sont aussi des variables à prendre en compte (la porosité facilite le transport des composants dissous dans l'eau contenue dans le sol autour des grains dans le modèle microstructurale de la partie D) : des études plus rigoureuses sur la composition d'un LHR, beaucoup plus complexe et variable que celle d'un ciment portland, et les étapes cinétiques de ses réactions d'hydratation pourraient être un point clé pour l'optimisation du traitement.

Ainsi, le traitement aux liants hydrauliques de la couche de forme reste un système complexe et difficile à étudier, mais plusieurs études peuvent être envisagées qui pourraient permettre dans un futur la normalisation de nouveaux essais pour l'adaptation du traitement aux sols problématiques sans besoin d'utiliser des nouveaux granulaires.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] C. EST, «societe,» [En ligne]. Available: <http://www.societe.com/societe/colas-est-329198337.html>. [Accès le 15 2 2016].
- [2] P. Falzon, «Le Moniteur,» [En ligne]. Available: <http://www.lemoniteur.fr/article/colas-est-se-dote-d-un-laboratoire-a-la-pointe-28861962> . [Accès le 15 2 2016].
- [3] N.Cabane, Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation., HAL, 2005.
- [4] S. Lucile, Traitement des sols aux liants hydrauliques: Aspects géotechniques et physico-chimiques des perturbations de solidifications., HAL, 2013.
- [5] B. Amor, Les conditions d'exploitation d'un produit montmorillonitique stabilisé à l'aide de ciment et mis en forme par extrusion., Rennes: INSA, 1995.
- [6] S. -. LCPC, Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR) - Guide technique, SETRA, 1er septembre 1992 .
- [7] «Les argiles, genèse et utilisation,» 2015. [En ligne]. Available: www.normalesup.org/~clanglois/Sciences_Terre/Argiles/Argiles0.html.
- [8] J.Bonnet, Interactions entre des matériaux argileux et une milieu basique riche en calcium, 2006.
- [9] «Les Argiles,» 4 12 2015. [En ligne]. Available: www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/argile.htm.
- [10] Aggregation in concentrated kaolin suspensions stabilized by polyacrylate, 1990.
- [11] R. CALVET, Le sol propriétés et fonctions Tome 1 Construction et structure, phénomènes aux interfaces, DUNOD, 2003.
- [12] H. N. a. H.Nowamooz, Retrait et Gonflements des sols argileux compacts et naturels..
- [13] Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, Paris: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2000.
- [14] J. ABDO, Liants Hydraulique Routiers, Techniques de l'ingénieur, 2010.
- [15] M. R. U. D. N. D. H. U. P.-e. I.Français, Investigation experimentale de la perturbation d'un sol limoneux traite aux liants, 2013.
- [16] H. M. J. R. a. L. A. N. G. W. s. ., J. S. S. K. L. S. a. J. J. T. J W Bullard, Mechanisms of cement hydration, 2011.
- [17] M. J. C. a. M. K. Ben Armor, Stabilisation des matériaux montmorillonitiques par du ciment portland..
- [18] BRGM, «Carte géologique harmonisée du département du Bas-Rhin (67) Notice géologique,» 12

2007. [En ligne]. Available: <http://www.brgm.fr/>. [Accès le 16 02 2016].
- [19] D. Deneele, Investigation expérimentale de la perturbation d'un sol limoneux traité aux liants, TerDouest, 2013.
- [20] K. L. KONAN, Interactions entre des matériaux argileux et un milieu basique riche en calcium, Limoges: UNIVERSITE DE LIMOGES, 05/07/2006.
- [21] J. Leplat, Limons et loess, 1965.
- [22] «Sable naturels normalisés,» [En ligne]. Available: http://www.s-n-l.fr/Produits_fr_0_S196-1-_sable-normalise-cen-196-1-iso-679.html. [Accès le 02 05 2016].
- [23] «Argile Verte Illite surfine,» [En ligne]. Available: <http://www.aroma-zone.com/info/fiche-technique/argile-illite-verte-surfine-aroma-zone>. [Accès le 02 05 2016].
- [24] «Kaolin Polwhite KL,» [En ligne]. [Accès le 02 05 2016].

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 Profil des couches présentes dans une route.	10
Figure 2 Classification des sols [6]	11
Figure 3 : Classifications granulométriques utilisés en géologie [3]	12
Figure 4: Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres alumineux (cas de la $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$, kaolinite)	14
Figure 5: Représentation schématique des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdre alumineux (cas de l'illite).....	15
Figure 6: Représentation schématique de l'empilement des feuillets. Le dessin représente trois feuillets, avec trois couches chacun, qui figure ainsi une particule de montmorillonite. La distance de séparation des feuillets est δ et l'épaisseur est e	16
Figure 7: Représentation schématique de l'empilement des feuillets. Le dessin représente trois feuillets empilés qui figure ainsi une particule de kaolinite.....	17
Figure 8: Modélisation rudimentaire d'une plaquette d'argile [8] les plans basales sont perpendiculaires à l'axe cristallographique 001 les surfaces latérales sont parallèles à cet axe.....	18
Figure 9 : réactions du fluor et l'ammoniac pour donner ses acides conjugués.....	19
Figure 10: Représentation schématique du mécanisme d'adsorption de la molécule d'eau dans la couche tétraédrique ; le H^+ est fixé sur les oxygènes qui conforment les tétraèdres.	20
Figure 11 : Représentation schématique du mécanisme d'adsorption de la molécule d'eau dans la couche octaédrique ; le H^+ des hydroxyles, polarisé positivement, permet fixer les anions.	21
Figure 12 : Représentation du modèle de la triple couche électrique pour une surface chargée négativement. Ψ_i représente le potentiel électrique. IHP est le plan interne de Helmholtz et OHP est le plan externe de Helmholtz.	21
Figure 13: interaction de la sphère d'hydratation des ions calcium (qui a pour composition $\text{Ca}^{2+} + 6\text{H}_2\text{O}$) avec la surface basale siliceuse.	23

Figure 14: Diagramme de dissolution/précipitation des phases cimentaire en fonction du pH.	29
Figure 15 : À gauche : Évolution de la résistance de la pâte en fonction du temps en différenciant les contributions de chaque composante anhydre ; à droite : ITC qui montre l'évolution de la hydratation de l'alite, séparant les différentes étapes.	Error! No s'ha definit el marcador.
Figure 16 : Schéma du modèle microstructural pour les sols A1, A2 et B5. [6]	33
Figure 17: A droite : Image en MEB du limon de Louches sans traiter (image de la partie supérieure) et traité (image de la partie inférieure), et à gauche : limon LVE sans traiter (image de la partie supérieure) et traité (image de la partie inférieure).	34
Figure 18: Capacité de captation des ions calcium du kaolin, du ciment et de la montmorillonite (la montmorillonite appartient à la famille des smectites) en fonction du temps.	35
Figure 19 Carte géologique du Bas-Rhin. [18]	37
Figure 20 : Plan d'expérience élaboré en conjonction avec le tuteur industriel	40
Figure 21: Présentation des composants avant mélange.	41
Figure 22: Le premier mélange est entièrement stocké après hydratation.	42
Figure 23: Polissage du fond du pot pour extraire l'échantillon.	43
Figure 24: L'éprouvette en place dans la machine de traction.	43
Figure 25: Distributions de taille de particules de l'illite.	44
Figure 26: Distribution de la taille de particules de la kaolinite.	44
Figure 27: Distribution de la taille de particules de la smectite.	44

Figures Annexes

Figure 28 Le Bouteur	5
Figure 29 Le pulvimalaxeur	5
Figure 30 L'épandeur	5
Figure 31 Le compacteur	6
Figure 32 La niveleuse	6

Liste des tableaux

Tableau 1: Distribution des charges dans le motif de répétition sans considérer substitutions ____	16
Tableau 2: Distribution des charges dans le feuillet _____	Error! No s'ha definit el marcador.
Tableau 3: Notation cimentière pour les composants principaux d'une pâte de ciment pure. Error! No s'ha definit el marcador.	
Tableau 4 : Analyses chimiques de différents sols loessiques par Agafonoff, Lee, Meigen et Scherling [7] _____	Error! No s'ha definit el marcador.
Tableau 5 : Tableau détaillant les différents mélanges que nous avons réalisés. Error! No s'ha definit el marcador.	
Tableau 6 : Récapitulatif des masses des échantillons et de la masse d'eau. ____	Error! No s'ha definit el marcador.
Tableau 7 : Récapitulatif des résistances en compression de chaque mélange. _____	45

Tableaux Annexes

Tableau 8 : Tableau récapitulatif des liants disponibles dans le grand Est. _____	4
---	---

ANNEXES :

I) Tableau récapitulatif des liants disponible dans le grand Est.

LIANTS LAFARGE (Frangey (89))					
Nom commercial	Composition	Début de prise	Rc (au bout de 7j)	Utilisations/Précautions	Type de sol traité
ROLAC 645 HRB 30	70%(+/-10%) de Clinker Portland 25%(+/-10%) de calcaire		≥ 30MPa	Utilisations : Traitement des sols pour création de couches de forme de chaussées, pistes, plateforme industrielles, parkings, routes forestières, exploitation agricole, traitement des graves et sables utilisés pour la confection des assises de chaussées, retraitement en place des chaussées Précautions : ne pas utiliser pour béton armé, température de mise en œuvre supérieure à 5°C (celle de sol aussi), appliquer une couche de cure sur le matériau traité pour éviter la dessiccation	Limon A2
ROLAC PI HRB 30	95%(+/-10%) de Clinker Portland SO ₃ < 3%	Moins de 45min	≥ 25MPa	Utilisations : sols humides voire très humides, réutilisation de remblais, plateformes et pistes Précautions : pas pour le béton armé, appliquer une couche de cure sur le matériau traité pour éviter la dessiccation, peut être utilisé en arrière-saison à une température > 5°C	sols fins (A1, A2) sols sableux et graveleux avec fines (B1, B2, B3, B4, B5, B6) sols de classe C (C1A1, C1A2)

LIANTS HAURI					
PUZ	79% de Clinker 21% de pouzzolanes naturelles	≥ 120min	52,5MPa (28jours)		
PHOCAL C15	47% de Clinker 15% de chaux 38% de pouzzolanes 5% activant de prise (CaSO ₄)	≥ 180min	≥ 30MPa	<p>La description de ces produits par le fabricant indique que cette série PHOCAL peut être composée sur mesure par rapport au type de sol ce qui permet son utilisation pour tout type de sol.</p> <p>Les produits peuvent également être déclinés en « SR » qui réduisent les émissions de poussières.</p>	
PHOCAL C30	38% de Clinker 30% de chaux 32% de pouzzolanes 4% activant de prise (CaSO ₄)	≥ 180min	≥ 30MPa		
PHOCAL C50	28% de Clinker 50% de chaux 22% de pouzzolanes 3% activant de prise (CaSO ₄)	≥ 180min	≥ 30MPa		
PHOCAL C70	17% de Clinker 70% de chaux 13% de pouzzolanes 3% activant de prise (CaSO ₄)	≥ 180min	≥ 30MPa		
ZIP 35	55% de Clinker 45% de pouzzolanes	≥ 180min	≥ 30MPa	Liant spécial qui permet de neutraliser les substances toxiques du sol et d'améliorer la densité du sol	Tous

LIANTS CALCIA					
LIGEX 16 EPR	Laitier activé au clinker		≥ 23MPa	<p>Efficace pour des chantiers sensibles comme les zones urbaines, industrielles, aéroports et zones de culture. Il réduit également les émissions de poussière.</p> <p>Il faut au préalable appliquer une couche de cure sur la matériau à traiter avant l'application du liant</p>	Sols type A-B-C-D
LIGEX 111 ou 103	Forte teneur en clinker		≥ 26MPa	<p>Spécialement adapté au traitement de sables et graves</p> <p>Il faut au préalable appliquer une couche de cure sur la matériau à traiter avant l'application du liant</p> <p>Problèmes de mises en œuvres pour certains dérivés de ce produit si la température est inférieure à 10°C.</p>	Sols type A-B-C-D
LIGEX FPL 1	Forte teneur en laitier activé au clinker	Délai de maniabilité important	≥ 27MPa	<p>Il faut au préalable appliquer une couche de cure sur la matériau à traiter avant l'application du liant</p> <p>Problèmes de mises en œuvres pour certains dérivés de ce produit si la température est inférieure à 10°C.</p>	Sols type A-B-D
LIGEX SP 6	Clinker + cendres volantes		≥ 21MPa	<p>Il faut au préalable appliquer une couche de cure sur la matériau à traiter avant l'application du liant</p> <p>Problèmes de mises en œuvres si la température est inférieure à 5°C</p>	Tous

LIANTS HOLCIM/EQIOM					
ROC AS	Forte teneur en laitier + puissant activant	Délai de maniabilité élevé	140 MPa	Problèmes de mises en œuvres si la température est inférieure à 5°C	Tous
ROC SOL	Composition brevetée			Liant spécial pour les sols argileux, évite le prétraitement à la chaux	Sols fins
ROC SC	Forte teneur en laitier + puissant activant	Maniabilité ≥ 15heures		Problèmes de mises en œuvres si la température est inférieure à 5°C	Craies, calcaires et matériaux basiques
ROC FA	Clinker	Maniabilité jusqu'à		Liant polyvalent	Tous
ROC LG	Forte teneur en laitier + puissant activant	Maniabilité ≥ 8heures			Pas efficace sur des sols fins
ROC SI	Forte teneur en Clinker + puissant activant	Maniabilité jusqu'à 6heures		Ne pas mettre en place en arrière-saison ou par temps frais	Sols siliceux mais non efficace sur des sols fins
ROC VDS	Forte teneur en laitier + puissant activant	Maniabilité ≥ 8heures		Liant polyvalent Utilisation recommandée par temps frais Problèmes de mises en œuvres si la température est inférieure à 5°C	Tous

Tableau 9 : Tableau récapitulatif des liants disponibles dans le grand Est.

II) Engins utilisés lors de l'élaboration d'une couche de forme



Figure 28 Le Bouteur



Figure 29 Le pulvimalaxeur



Figure 30 L'épandeur



Figure 31 Le compacteur

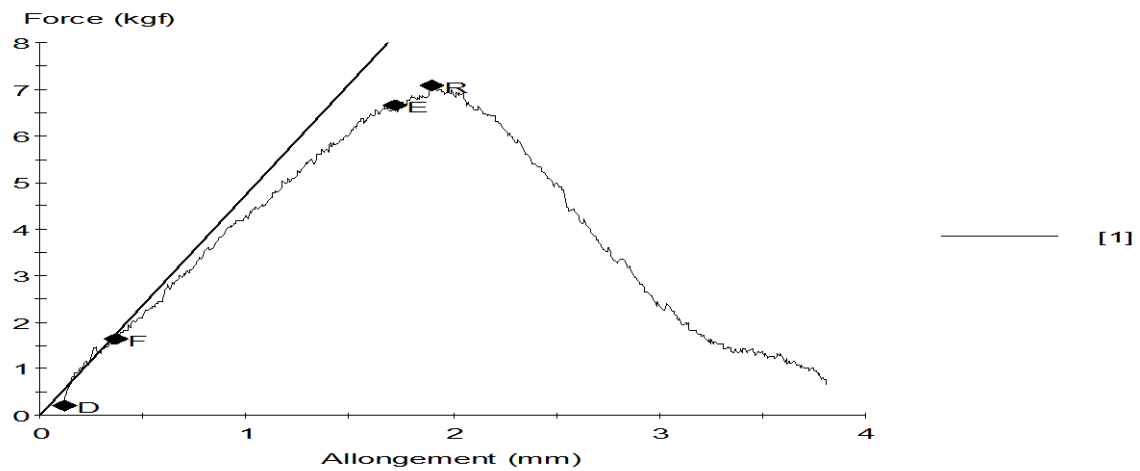


Figure 32 La niveleuse

III) Résultats des expériences

i. Test en compression à 14 j.

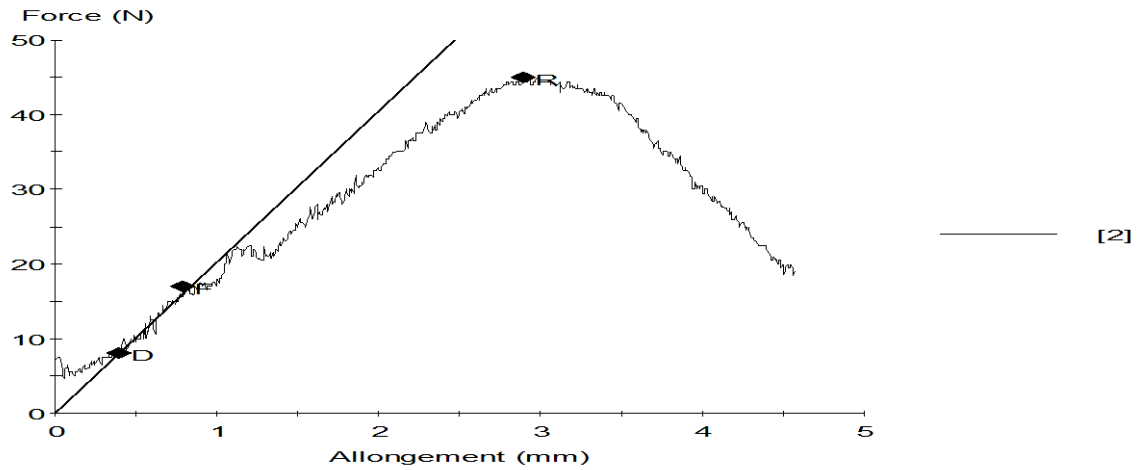
Eprouvette Mélange 1 :



Résultats de l'éprouvette:

Nom	Valeur	Unité
Epaisseur	27,740	mm
Largeur	68,170	mm
Force maximale	69,499	N
Contrainte maximale	5849	Pa
Module	1,249	MPa

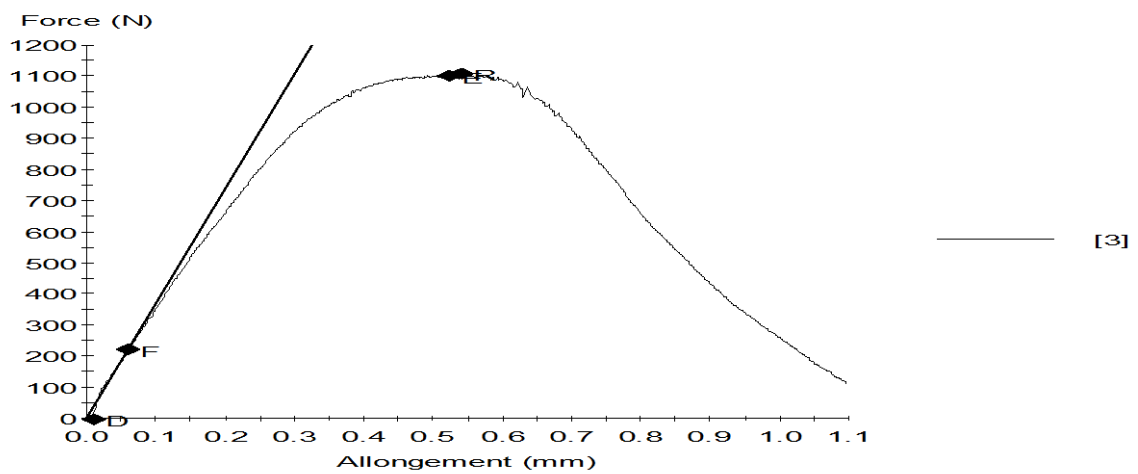
Eprouvette Mélange 2 :



Résultats de l'éprouvette:

Nom	Valeur	Unité
Epaisseur	27.000	mm
Largeur	67.350	mm
Force maximale	44.999	N
Contrainte maximale	3929	Pa
Module	0.567	MPa

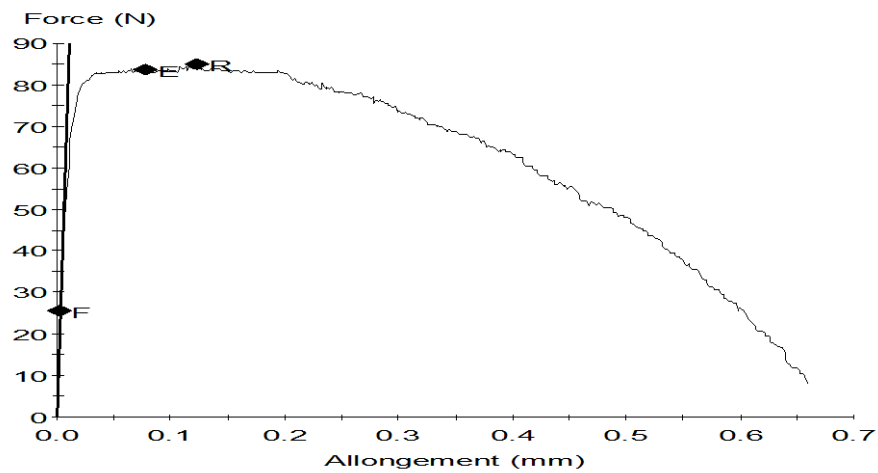
Eprouvette Mélange 3 :



Résultats de l'éprouvette:

Nom	Valeur	Unité
Epaisseur	27,920	mm
Largeur	69,050	mm
Force maximale	1108,982	N
Contrainte maximale	1,8	MPa
Module	96.954	MPa

Eprouvette Mélange 4 :

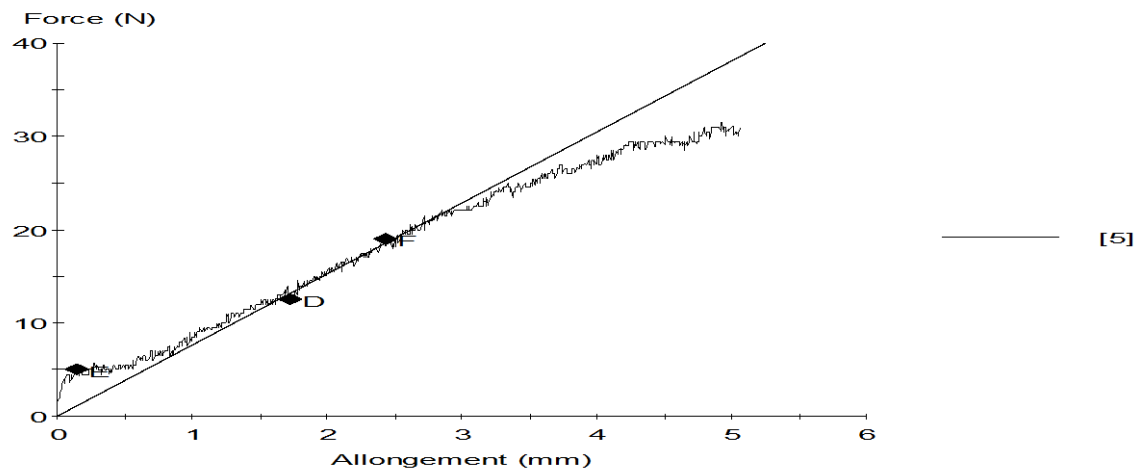


[4]

Résultats de l'éprouvette:

Nom	Valeur	Unité
Epaisseur	27,930	mm
Largeur	68,280	mm
Force maximale	84,999	N
Contrainte maximale	7092	Pa
Module	232,721	MPa

Eprouvette Mélange 5 :

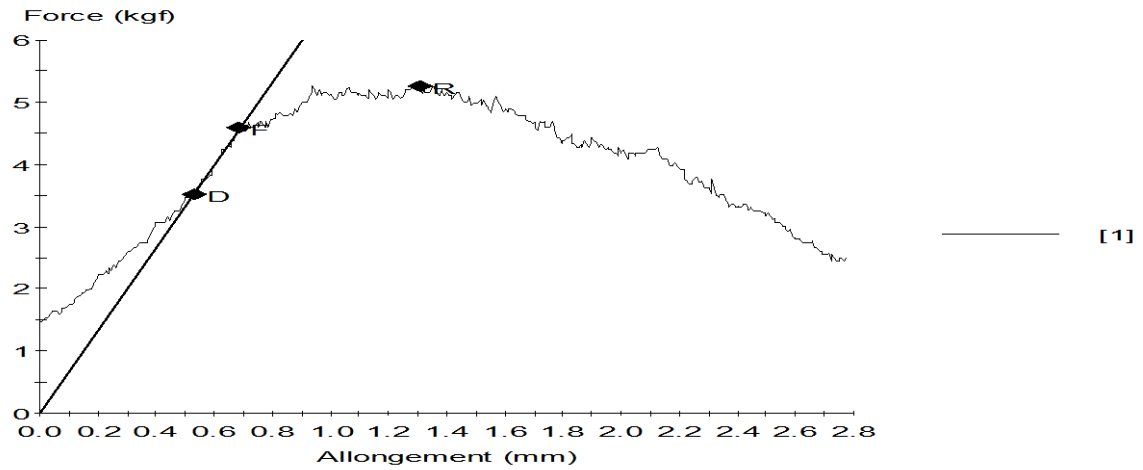


Résultats de l'éprouvette:

Nom	Valeur	Unité
Epaisseur	27,770	mm
Largeur	65,090	mm
Force maximale	31,499	N
Contrainte maximale	2779	Pa
Module	0,214	MPa

ii. Tests en compression à 21 j.

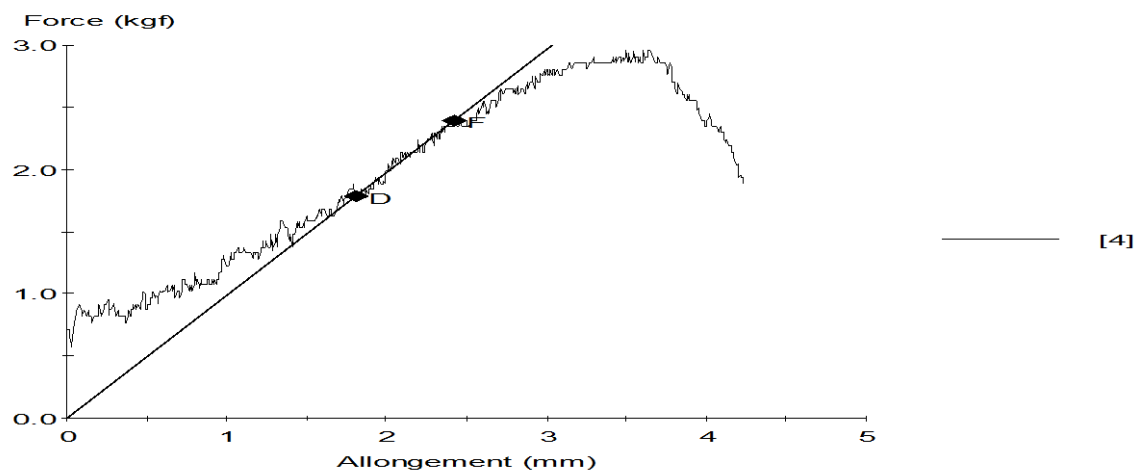
Mélange 1 :



Résultats de l'éprouvette:

Nom	Valeur	Unité
Epaisseur	27,620	mm
Largeur	66,820	mm
Force maximale	51,633	N
Contrainte maximale	4452	Pa
Module	1,794	MPa

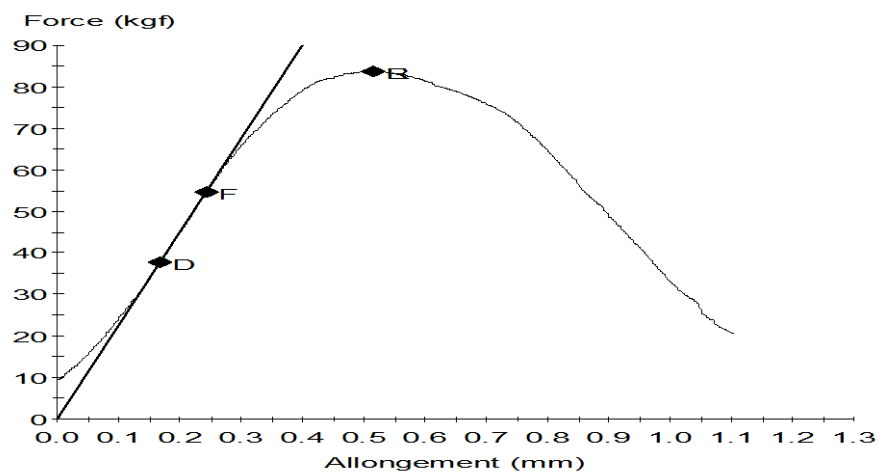
Mélange 2 :



Résultats de l'éprouvette:

Nom	Valeur	Unité
Epaisseur	26,840	mm
Largeur	65,160	mm
Force maximale	29,000	N
Contrainte maximale	2640	Pa
Module	0,281	MPa

Mélange 3 :

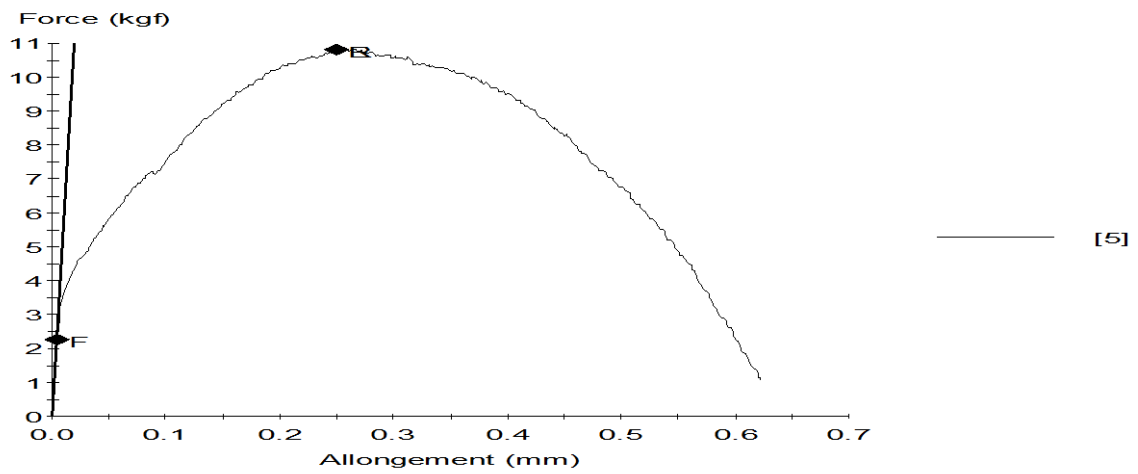


[3]

Résultats de l'éprouvette:

Nom	Valeur	Unité
Epaisseur	27,780	mm
Largeur	67,070	mm
Force maximale	821,487	N
Contrainte maximale	0,7	MPa
Module	59,861	MPa

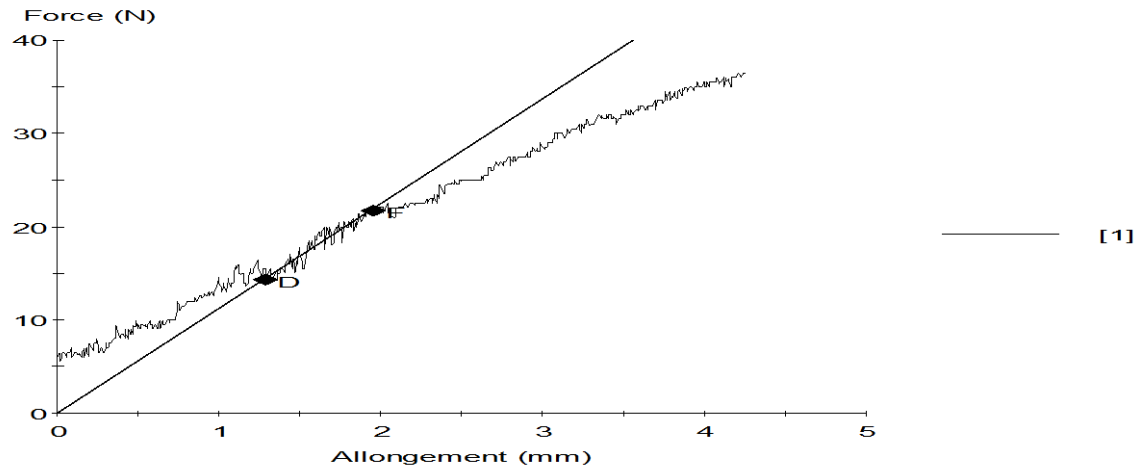
Mélange 4:



Résultats de l'éprouvette:

Nom	Valeur	Unité
Epaisseur	27,990	mm
Largeur	69,130	mm
Force maximale	105,998	N
Contrainte maximale	8640	Pa
Module	142,341	MPa

Mélange 5 :

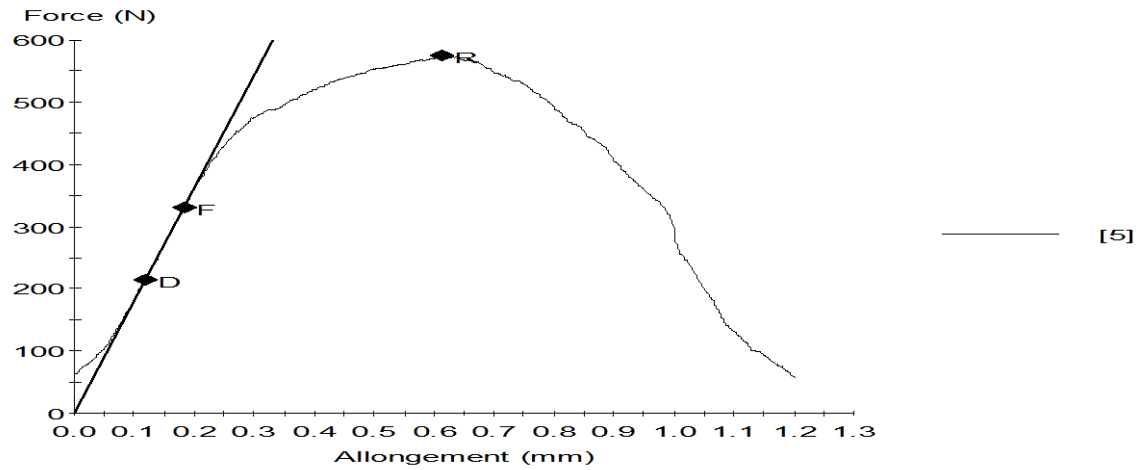


Résultats de l'éprouvette:

Nom	Valeur	Unité
Epaisseur	26,420	mm
Largeur	65,800	mm
Force maximale	36,499	N
Contrainte maximale	3341	Pa
Module	0,328	MPa

iii. Tests en compression à 28j.

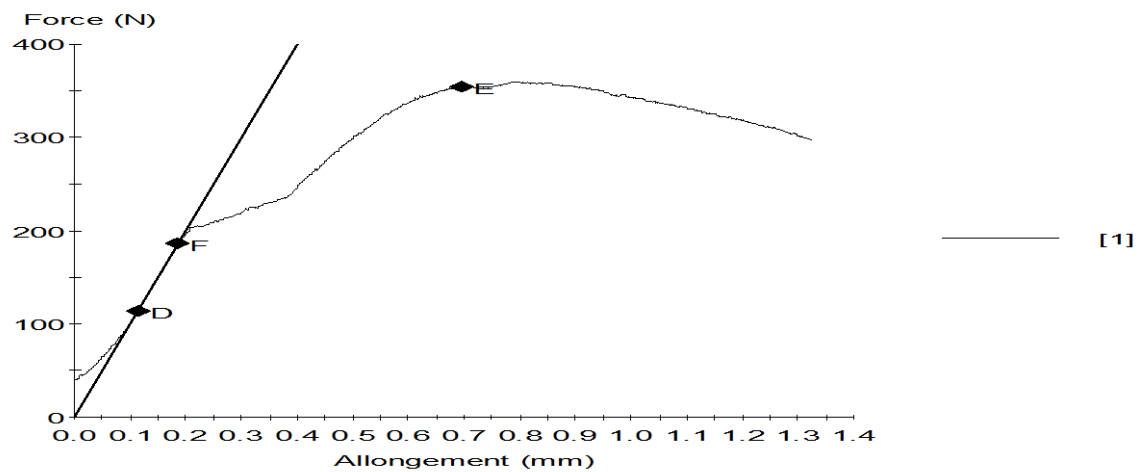
Mélange 3 :



Résultats de l'éprouvette:

Nom	Valeur	Unité
Epaisseur	28,100	mm
Largeur	69,120	mm
Force maximale	574,991	N
Contrainte maximale	0,3	MPa
Module	47,270	MPa

Mélange 4 :



Résultats de l'éprouvette:

Nom	Valeur	Unité
Epaisseur	27,920	mm
Largeur	68,300	mm
Force maximale	358,994	N
Contrainte maximale	0,2	MPa
Module	26,486	MPa